



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

NIKO TÄHTINEN
DIESELMOOTTORIN PAKOSARJAN LÄMPÖJÄNNITYSTEN
SIMULOINTI

Diplomityö

Tarkastaja:
Associate Professor Sami Pajunen
Tarkastaja ja aihe hyväksytty teknis-
ten tieteiden tiedekunnan dekaanin
päätöksellä 31. lokakuuta 2018

TIIVISTELMÄ

TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Teknisten tieteiden tiedekunta

NIKO TÄHTINEN: Dieselmoottorin pakosarjan lämpöjännitysten simulointi

Tampereen teknillinen yliopisto

Diplomityö, 64 sivua, 0 liitesivua

Joulukuu 2018

Konetekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma

Pääaine: Energiatehokkuus

Tarkastaja: Associate Professor Sami Pajunen

Avainsanat: dieselmoottori, pakosarja, lämpötilajakauma, lämpöjännitys

Pakosarja on dieselmoottorin perusosa, joka joutuu kovalle rasitukselle mekaanisten kuormitusten lisäksi korkeiden lämpötilavaihteluiden ja lämpötilaerojen johdosta. Tässä diplomityössä tutustuttiin mäntämoottorin toimintaperiaatteeseen ja käytiin läpi pakosarjan toimintaan liittyviä perusteorioita kaasuvirtauksen, lämmönsiirron ja lämpöjännitysten osalta. Lisäksi perehdyttiin aiheesta tehtyihin artikkeleihin ja käytiin läpi mitä tilanteita ja miten aiemmin on pakosarjan lämpöjännityksiä tutkittu.

Työssä tutkittiin dieselmoottorin pakosarjaan lämpötilajakaumia ja näiden aiheuttamia lämpöjännityksiä simuloimalla. Pakosarjan lämpötilajakaumaa simuloitiin, sekä aikariippumattomana, että aikariippuvaisena tilanteena. Saatuja lämpötilajakaumia käytettiin reunaehtoina lämpöjännitysten simulointiin. Simulointien tuloksena pystyttiin päättämään pakosarjaa eniten rasittavat moottorin kuormitustilanteet.

Simuloinnilla saatuja pakosarjan lämpötilajakaumia verrattiin lämpökameralla otettuihin kuviin ja saatuja lämpöjännitysten tuloksia verrattiin rasiustestissä vaurioituneeseen pakosarjaan. Tulosten perusteella simuloinnilla pystytään toistamaan rasiustestissä pakosarjaan syntyneet vauriot.

Lopuksi työssä pohdittiin mahdollisia tulosten tarkkuuteen vaikuttavia virhelähteitä. Tämän lisäksi mietittiin, miten nyt tehtyä simulointia voitaisiin jatkojalostaa paremmaksi.

ABSTRACT

TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

The Faculty of Engineering Sciences

NIKO TÄHTINEN:

Simulation of Thermal Stress of Diesel Engine Exhaust Manifold

Master of Science Thesis, 64 pages, 0 Appendix pages

December 2018

Master's Degree Program in Mechanical Engineering

Major: Energy Performance

Examiner: Associate Professor Sami Pajunen

Keywords: Diesel Engine, exhaust manifold, Temperature Distribution, Thermal Stress

The exhaust manifold is the basic part of a diesel engine that is under heavy conditions like mechanical loads, high change of temperature and temperature differences. This thesis examines the principle of the piston engine and the basic principles of the operation of the exhaust manifold for gas flow, heat transfer and thermal stresses. In addition, are studied articles on the subject and looked at what states and how the heat stresses of the exhaust manifold were previously studied.

The thesis investigated the temperature distributions of the diesel engine exhaust manifold and based of them simulated the thermal stresses. The temperature distribution of the exhaust manifold was simulated, both time independent and time dependent. The obtained temperature distributions were used as boundary conditions for the simulation of thermal stresses. As a result of the simulations, could be found the worst load cases of the engine for exhaust manifold.

The simulations of the exhaust manifold temperature distributions were compared with images taken with the thermal camera and the results of the thermal stresses simulation compared with the exhaust manifold damages from dyno run. Based on the results, the simulation can be used to reproduce the damage caused by the exhaust manifold in the dyno run.

Finally, there was thinking of potential sources of error affecting the accuracy of the results. In addition, we considered how simulation can be further

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty AGCO Power Oy:n tuotekehitysosastolle syksyllä 2018. Työ on laadittu Tampereen teknillisen yliopiston konetekniikan koulutusohjelmassa energia-
tehokkuuden pääaineopintoihin ja lujuusopin sivuaineopintoihin. Haluan kiittää AGCO
Powerin Jussi Immosta ja Tampereen teknillisen yliopiston Associate Professor Sami Pa-
justa työn ohjaamisesta.

Kiitokset kuuluvat myös Tampereen teknillisen yliopiston professori emeritus Pentti Saa-
renrinteelle hyvistä ja tärkeistä neuvoista. Haluan kiittää myös esimiestäni Pekka
Roivasta tämän diplomityön tekemisen mahdollistamisesta, sekä muuta AGCO Powerin
tuotekehityksen henkilöstöä saadusta tuesta.

Suuri kiitos kuuluu myös perheelleni ja ystävilleni saamastani kannustuksesta tämän työn
ja koko opiskelujeni ajalta.

Tampereella, 5.11.2018

Niko Tähtinen

SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO	1
2.	PAKOSARJA POLTTOMOOTTORISSA	2
2.1	Polttomoottori.....	2
2.2	Pakosarja	5
3.	TEORIA	7
3.1	Virtaustapahtumaa hallitsevat yhtälöt	7
3.1.1	Massan säilyminen (jatkuvuusyhtälö).....	7
3.1.2	Liikemäärän säilyminen	7
3.1.3	Energiayhtälö	8
3.2	Lämmönsiirtoa hallitsevat yhtälöt	8
3.2.1	Johtuminen	9
3.2.2	Säteily.....	11
3.2.3	Konvektio.....	13
3.3	Lämpöjännitykset	14
3.4	Kontrollitilavuusmenetelmä	15
3.5	Turbulenssimalli.....	16
4.	KATSAUS AIEMPIIN TUTKIMUKSIIN	18
4.1	Lämpöjännitys analyysi auton dieselmoottorin pakosarjalle	18
4.2	Tukiripojen vaikutus pakosarjan lämpöjännitysten vähentämisessä.....	20
5.	TARKASTELTAVA PAKOSARJA JA KÄYTETTÄVÄT LÄHTÖTIEDOT	23
5.1	Tarkasteltava pakosarja	24
5.1.1	Pakosarjan vauriot.....	28
5.2	Käytettävät lähtötiedot	32
6.	SIMULOINTI	35
6.1	Geometria	35
6.2	Laskentaverkot	38
6.2.1	CFD-laskentaverkko	38
6.2.2	FEM-laskentaverkko	41
6.3	Simuloitavat tilanteet.....	43
6.3.1	CFD.....	43
6.3.2	FEM	44
7.	TULOKSET	46
7.1	Lämpötilajakaumat.....	46
7.2	Lämpökamera.....	51
7.3	Jännitykset	53
7.4	Päätelmät	57
8.	VIRHELÄHTEET JA NIIDEN KARSINTA	58
8.1	Lähtöarvot	58
8.2	Materiaalit	58
8.3	Tilanteiden kuvaus	59

8.4 Tulosten paikkansapitävyys	59
9. YHTEENVETO	61
LÄHTEET	63

KUVALUETTELO

<i>Kuva 1. Mäntämoottorin perusgeometria [1, s. 9]</i>	<i>3</i>
<i>Kuva 2. Nelitahtimoottorin työkierto [1, s. 10].....</i>	<i>4</i>
<i>Kuva 3. Pakoputkiston periaatekuva [3]</i>	<i>5</i>
<i>Kuva 4. Yksinkertainen valurautainen pakosarja [4]</i>	<i>6</i>
<i>Kuva 5. Taivutetuista putkista valmistettu peltipakosarja [5]</i>	<i>6</i>
<i>Kuva 6. Yksinkertainen johtuminen seinän läpi [8].....</i>	<i>10</i>
<i>Kuva 7. Mustan kappaleen spektromagneettinen käyrä [9]</i>	<i>12</i>
<i>Kuva 8. Turboahdetun nelisylinterisen moottorin pakosarja [11]</i>	<i>18</i>
<i>Kuva 9. Pakosarjan kanavat jaettuna yksinkertaisiin standardi muotoihin [11]</i>	<i>19</i>
<i>Kuva 10. Komatsun kuusisylinterisen dieselmoottorin pakosarja [12]</i>	<i>20</i>
<i>Kuva 11. Pakosarjassa testatut kahdenlaiset tukirivat [12]</i>	<i>21</i>
<i>Kuva 12. Varmuuskertoimesta kertova kuvaaja ja varmuuskertoimet geometriassa [12].....</i>	<i>22</i>
<i>Kuva 13. Valtran BE 1035e sokeriruokopuimuri, jossa käytetään Agco Power Oy:n valmistamaa dieselmoottoria [13]</i>	<i>23</i>
<i>Kuva 14. Pakosarjasta moottoriin kiinnitettyinä</i>	<i>24</i>
<i>Kuva 15. Havainnollistava kuva pakosarjan 3D-mallista</i>	<i>25</i>
<i>Kuva 16. Havainnollistava kuva pakosarjan 3D-mallista sylinterikannen puolelta</i>	<i>25</i>
<i>Kuva 17. Havainnollistava kuva pakosarjan 3D-mallista ylhäältäpäin</i>	<i>26</i>
<i>Kuva 18. Pakosarjan osien välisen liitoksen periaate</i>	<i>27</i>
<i>Kuva 19. Pakosarjan poikkileikkaus ja virtauskanavat</i>	<i>28</i>
<i>Kuva 20. Pakosarjan päämitat.....</i>	<i>28</i>
<i>Kuva 21. Syntyneet vauriot ensiöputkien sisämutkissa</i>	<i>29</i>
<i>Kuva 22. Vaurio pakosarjan kaulan puolivälillä.....</i>	<i>30</i>
<i>Kuva 23. Vaurio pakosarjan kaulan puolivälillä pakosarjan sisällä</i>	<i>31</i>
<i>Kuva 24. Pakokaasun massavirta yhtä sylinteriä kohden moottorin pyörimisnopeuden suhteen</i>	<i>32</i>
<i>Kuva 25. Pakosarjassa vallitseva paine moottorin pyörimisnopeuden suhteen</i>	<i>33</i>
<i>Kuva 26. Pakokaasun lämpötila moottorin pyörimisnopeuden suhteen.....</i>	<i>34</i>
<i>Kuva 27. Käytettävä sylinterikannen geometria</i>	<i>36</i>
<i>Kuva 28. Käytettävä pakosarjan tiivisteiden geometria</i>	<i>37</i>
<i>Kuva 29. Pakosarja kiinnitettyinä sylinterikansiin, koko käytettävä geometria</i>	<i>37</i>
<i>Kuva 30. Nimetyt sisään- ja ulosvirtausalueet.....</i>	<i>39</i>
<i>Kuva 31. Nimetty sylinterikansien vesitilan alue</i>	<i>39</i>
<i>Kuva 32. Muodostettu tetraedri laskentaverkko</i>	<i>40</i>
<i>Kuva 33. Tetraedrin ja polyedrin erot [14, s. 114].....</i>	<i>40</i>
<i>Kuva 34. Muodostettu polyedri laskentaverkko</i>	<i>41</i>
<i>Kuva 35. Holkki, johon käytetty ANSYS Meshin sweep -toimintoa.....</i>	<i>41</i>
<i>Kuva 36. Tiivistepintojen tihennetyt laskentaverkon alueet.....</i>	<i>42</i>
<i>Kuva 37. FEM laskentaverkko</i>	<i>43</i>

<i>Kuva 38. Geometrian simuloitu lämpötilajakauma</i>	<i>46</i>
<i>Kuva 39. Pakosarjan keskiosan lämpötilajakauma, josta huomataan tukiripojen matalat lämpötilat</i>	<i>47</i>
<i>Kuva 40. Pakosarjan kaulan poikkileikkauksen lämpötilapisteet.....</i>	<i>48</i>
<i>Kuva 41. Ajasta riippumattomien simulointien pistemäisten lämpötilojen lämpötilaeroja eri pisteiden välillä</i>	<i>49</i>
<i>Kuva 42. Pistemäisten lämpötilojen kehittyminen ajan suhteen.....</i>	<i>50</i>
<i>Kuva 43. Lämpötilaerojen kehittyminen ajansuhteen.....</i>	<i>51</i>
<i>Kuva 44. Pakosarjan päätyosan lämpökamerakuvan ja simuloitujen tulosten vertailu.....</i>	<i>52</i>
<i>Kuva 45. Pakosarjan keskiosan lämpökamerakuvan ja simuloitujen tulosten vertailu.....</i>	<i>52</i>
<i>Kuva 46. Pakosarjan jännitys jakauma moottorin ulkopuolelta.....</i>	<i>53</i>
<i>Kuva 47. pakosarjan jännitys jakauma moottorin puolelta</i>	<i>54</i>
<i>Kuva 48. Jännityskeskittymä pakosarjan kaulalla 10 s., 60 s. ja 800 s. ajanhetkillä.</i>	<i>56</i>
<i>Kuva 49. Jännitysesiintymät pakosarjan ensiöputkien sisämutkissa ajanhetkillä 10 s. ja 60 s.</i>	<i>56</i>
<i>Kuva 50. Pallografiittivaluraudan jännitys-venymäkäyrä eri lämpötiloissa [15]</i>	<i>59</i>

TAULUKKOLUETTELO

<i>Taulukko 1. Tavallisimpien aineiden keskimääräisiä lämmönjohtavuuksia [7, s. 254].....</i>	<i>11</i>
<i>Taulukko 2. Emissiokertoimia [7, s. 264]</i>	<i>13</i>
<i>Taulukko 3. Aikariippumattomat simuloitavat tilanteet.....</i>	<i>44</i>
<i>Taulukko 4. Ajasta riippumattomien simulointien pistemäiset lämpötilat.....</i>	<i>48</i>
<i>Taulukko 5. Ajasta riippumattomista lämpötilajakaumista simuloituvat jännitykset</i>	<i>54</i>
<i>Taulukko 6. Ajasta riippuvista lämpötilajakaumista simuloituvat jännitykset</i>	<i>55</i>

LYHENTEET JA MERKINNÄT

Alakuolokohta	Kammen asento, jossa kampi on alimmassa mahdollisessa asennossa, moottorissa sylinterin tilavuus on suurin mahdollinen.
ANSYS Fluent	Tietokoneohjelmisto numeerisen virtausdynamiikan ratkaisemiseen.
ANSYS Mechanical	Tietokoneohjelmisto lujuuslaskennan suorittamiseen.
ANSYS Mesh	Tietokoneohjelmisto laskentaverkon luomiseen
BC	Bottom-center, Alakuolokohta
CFD	Computational fluid dynamics. Numeerinen virtausdynamiikka.
Control Volume Faces	Kontrollitilavuuden rajaavat reunat
Creo	3D-suunnitteluohjelmisto
DNS	Direct numerical simulation. Laskentamenetelmä, jolla saadaan tarkka ratkaisu.
FEM	Finite element method. Elementtimenetelmä
Finite Volume Method	Kontrollitilavuusmenetelmä
LES	Large Eddy simulation. Ajasta riippuva laskentamenetelmä, jossa ainoastaan suurten pyörteiden skaalat lasketaan tarkasti ja pienet mallinnetaan.
Node	Solupiste kontrollitilavuuden keskipisteessä
Puristussuhde	Sylinterin suurimman ja pienimmän tilavuuden suhde.
RANS	Reynolds averaged Navier Stokes. Laskentamenetelmä, jossa yhtälöt aikakeskiarvotetaan ja yhtälöistä ratkaistaan keskiarvokenttä.
TC	Top-center, Yläkuolokohta
Yläkuolokohta	Kammen asento, jossa kampi on ylimmässä mahdollisessa asennossa, moottorissa sylinterin tilavuus on pienin mahdollinen.
A	Pinta-ala
C_μ	Mallivakio, joka on johdettu mittauksiin perustuen
E	Kaasun energia
E_k	Kimmokerroin
E_s	Partikkelin sisäinen energia
k	Turbulenssin kineettinen energia massayksikkö kohden
k_e	Lämmönjohtavuus
m^2	Neliömetri
p	Paine
Q	Lämpöteho
q	Lämpövuoto
S_E	Lähdetermi
S_{Mx}	Lähdetermi
T	Lämpötila
T_K	Lämpötila Kelvineinä
u	Nopeus x-suuntaan
v	Nopeus y-suuntaan
V_c	Sylinterin vapaa tilavuus

V_d	Sylinterin iskutilavuus
V_t	Sylinterin kokonaistilavuus
w	Nopeus z-suuntaan
x_p	Seinän paksuus
α	Materiaalin laajenemiskerroin
ΔL	Pituuden muutos
ε	Kineettisen energian dissipaationopeus massayksikköä kohden
ε_e	Emissiokerroin
μ	Poisson vakio
μ_t	Turbulentti viskositeetti
ρ	Tiheys
σ_s	Stefan-vakio ($5,6697 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$)
σ_x	X-suuntainen jännitys
σ_y	Y-suuntainen jännitys
σ_z	Z-suuntainen jännitys
τ_{yx}	Leikkausjännitys
τ_{zx}	Leikkausjännitys
τ_{xx}	Pintajännitys
∂x	Matkan muutos x-suunnassa
∂y	Matkan muutos y-suunnassa
∂z	Matkan muutos z-suunnassa

1. JOHDANTO

Nykyajan sarjatuotantona valmistettavissa moottoreissa materiaalien kestävyys ovat äärirajoilla ja asiakkaat haluavat aina vain tehokkaampia, kevyempiä ja halvempia tuotteita. Moottorin komponentteihin kohdistuvat rasitukset eivät kuitenkaan juuri vähene kehityksen johdosta. Korkeat lämpötilaerot ja -vaihtelut, moottorin sisäiset ja ulkoiset täri- nät ja muut mekaaniset kuormitukset koettelevat moottorin eri osia. Materiaalivahvuudet pyritään minimoimaan keveyden saavuttamiseksi ja materiaalien pitää olla halpoja ominaisuuksiin nähden valmistuskustannusten minimoimiseksi.

Yksi näistä osista, joille kohdistuu korkeita vaatimuksia, on pakosarja. Moottorin perus- osiin lukeutuva pakosarja ohjaa sylintereistä syntyneet palokaasut moottorista pakoput- keen ja edelleen pakokaasun jälkikäsittelylaitteistolle. Pakosarja altistuu kylmälle ulkoil- malle ja jopa $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ lämpötilaan nouseville palokaasuille, mikä aiheuttaa suuria lämpö- tilan vaihteluita ja korkeita lämpötila eroja pakosarjan eri osien välille.

Tässä diplomityössä tutkitaan nopeakäyntisen nelitahtisen dieselmoottorin valurautaisen pakosarjan lämpöjännityksiä simuloimalla. Työn tavoitteena on löytää lämpöjännitysten kannalta pakosarjaa eniten rasittava moottorin kuormitustilanne. Tällöin pakosarjan suun- nitteluvaiheessa voidaan huomioda paremmin erilaisten muotojen ja materiaalivahvuuk- sien vaikutus pakosarjan kestävyys. Lämpöjännityksiä tutkitaan simuloimalla ole- massa olevaa pakosarjaa käyttämällä ANSYS Fluent ja ANSYS Mechanical -ohjelmis- toja, reunaehdot määritetään olemassa olevasta mittaustuloksesta, kirjallisuudesta löytyvillä taulukkoarvoilla ja ohjelmistojen kirjastoilla.

Työssä esitellään alkuun lyhyesti polttomoottorin perustoimintaa, sekä kaasun virtauk- seen, lämmönsiirtoon ja lämpöjännityksiin liittyvää perusteoriaa. Näiden jälkeen käydään läpi muutama pakosarjan lämpöjännityksiin liittyvä tutkimus. Tarkastellaan työn tutki- muskohteeksi valikoitua pakosarjaa ja käytettävissä olevia mittaustuloksia, sekä simuloi- tavien tilanteiden ja reunaehtojen. Lopuksi käsitellään tutkimuksen tuloksia ja pohditaan tut- kimuksen mahdollisia virhelähteitä, sekä tulevaisuuden toimia tarkempien tulosten saa- miseksi.

2. PAKOSARJA POLTTOMOOTTORISSA

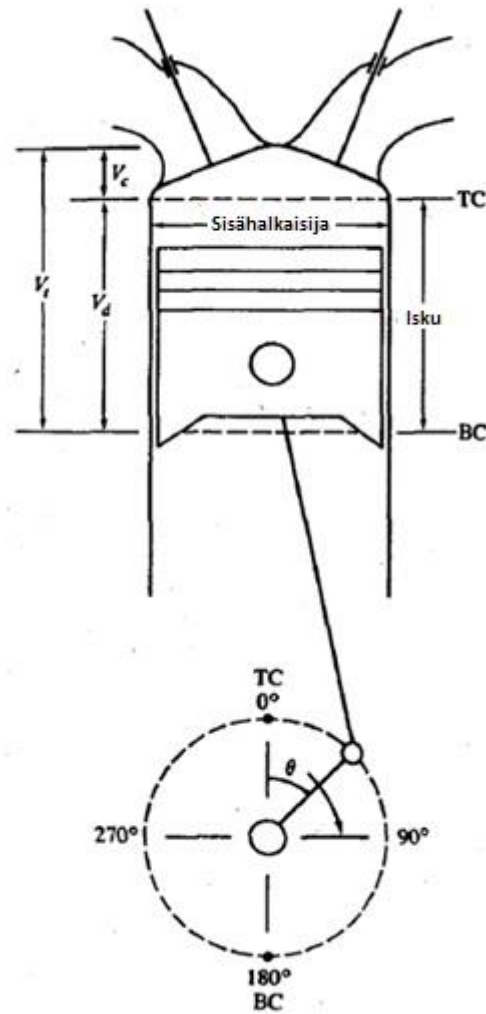
Tässä luvussa perehdytään pintapuolisesti polttomoottorin ja pakosarjan toimintaan. Ensin esitellään lyhyesti polttomoottorin perusteet ja sen jälkeen mäntämoottorin toimintaperiaate. Lopuksi tutustutaan pakosarjan toimintaan ja rakenteeseen.

2.1 Polttomoottori

Polttomoottori tuottaa mekaanista käyttövoimaa kemiallista energiaa sisältävästä polttoaineesta. Tämä energia muutetaan mekaaniseksi työksi polttamalla tai hapettamalla polttoaine moottorin sisällä. Polttoaine-ilma seosta, joka syötetään moottoriin ennen palamista ja palokaasuja palamisen jälkeen kutsutaan työtä tekeviksi kaasuiksi. Kemiallisen energian muutos mekaaniseksi työksi, joka tarjoaa halutun tehon, tapahtuu siis työkaasujen ja moottorin mekaanisten komponenttien välillä. [1, s. 1-2]

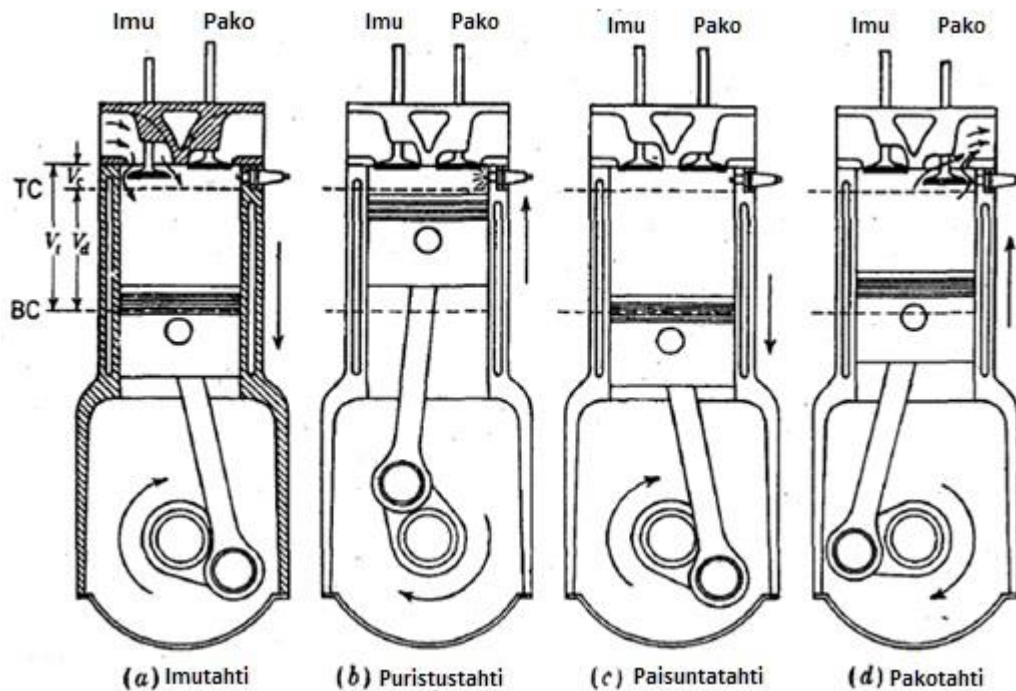
Yksinkertaisuuden, kestävyys ja teho/paino -suhteen ansiosta käytetyimmät polttomoottorityypit ovat mäntämoottoreita. Nämä voidaan jakaa kahteen tyyppi; kipinäsytytteisiin Otto-moottoreihin, joissa voidaan käyttää polttoaineena bensiiniä tai muita helposti syttyviä polttoaineita ja puristussytytteisiin eli dieselmootoreihin. Molempia moottorityyppejä löytyy monenlaisista liikkumisen ja sähköntuotannon sovelluksista. [1, s. 1-2]

Perinteisissä mäntämoottoreissa mäntä liikkuu edestakaisin sylinterissä ja siirtää voimaa kiertokangen ja kampimekanismin avulla käyttöakselille, jonka periaatekuva on esitetty kuvassa 1. Kampiakselin tasainen pyöriminen tuottaa syklisen männän liikkeen. Männän liike pysähtyy kun kampi saavuttaa yläkeskikohdan (top-center, TC) tai alakeskikohdan (bottom-center, BC), tällöin myös sylinterin tilavuus on, joko pienin tai suurin mahdollinen. Näitä kammien asentoja kutsutaan myös yläkuolo- ja alakuolokohdiksi. Pienintä sylinterin tilavuutta kutsutaan vapaaksi tilavuudeksi (V_c). Tilavuus, jonka männän liike aiheuttaa, kutsutaan iskutilavuudeksi (V_d). Tämä on myös sylinterin kokonaistilavuuden (V_t) ja vapaantilavuuden erotus. Suhdetta suurimman ja pienimmän sylinterin tilavuuden välillä kutsutaan puristussuhteeksi. Tyypillisiä puristussuhteen arvoja kipinäsytytteiselle moottorille on 8-12 ja puristussytytteiselle moottorille on 12-24. [1, s. 9-10]



Kuva 1. Mäntämoottorin perusgeometria [1, s. 9]

Valtaosa mäntämoottoreista toimii niin kutsutulla nelitahti työkierrolla. Tässä jokainen sylinteri vaatii neljä männän iskua, kaksi kampiakselin kierrosta, käydäkseen läpi kokonaisen työkierron ja tuottaakseen yhden työtahdin. Sekä kipinäsytytteinen, että puristus-sytytteinen moottori käyttää yleisesti tätä työkiertoa. Työkierron vaiheet on esitelty kuvassa 2 ja selitetty tarkemmin kuvan jälkeen. [1, s. 10-11]



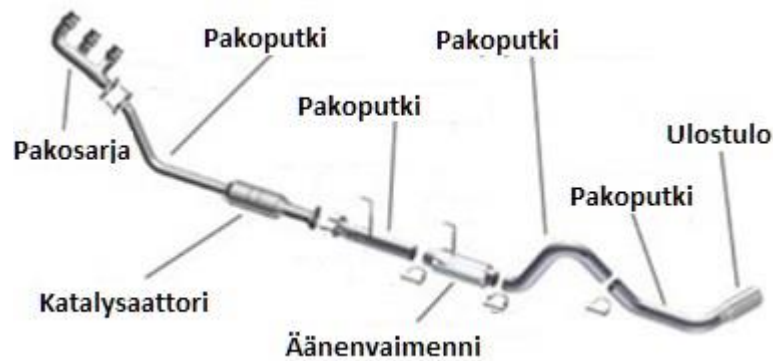
Kuva 2. Nelitahtimoottorin työkierto [1, s. 10]

- Imutahti, alkaa männän ollessa yläkuolokohdassa ja loppuu männän saavuttua alakuolokohtaan, joka vetää tuoretta seosta/ilmaa avautuvan imuventtiilin kautta sylinteriin.
- Puristustahti, jossa molemmat venttiilit ovat kiinni ja seos/ilma puristetaan murtoosaan alkutilavuudesta. Puristustahdin loppuvaiheessa seoksen palaminen alkaa ja paine sylinterissä nousee nopeasti.
- Työtahti tai paisuntatahti, joka alkaa männän ollessa yläkuolokohdassa ja loppuu alakuolokohtaan, jossa korkea lämpöinen ja korkea paineinen kaasu työntää männän alas ja pakottaa kammien pyörittämään. Männän saavuttua alakuolokohtaan pakoventtiili aukeaa ja sylinteripaine putoaa lähelle pakokanavan painetta.
- Pakotahti, jossa jäljelle jääneet palokaasut poistuvat sylinteristä sylinterikannen pakokanavaa pitkin. Ensin koska sylinterin paine on pakokanavaa korkeampi ja sitten männän työntämänä. Männän saavuttua yläkuolokohtaan imuventtiili aukeaa, pakoventtiili sulkeutuu ja kierto alkaa alusta.

Dieselmoottori on toiminnaltaan puristusytytteinen eli polttoaine sytytetään puristuksen aiheuttaman lämmön avulla. Moottorissa puristetun ilman lämpötilan kohotessa jopa yli $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ ruiskutetaan polttoaine palotilaan sylinterin yläosaan ja puristetun ilman lämpö saa polttoaineen syttymään. [2, s. 2]

2.2 Pakosarja

Moottorin pakoputkisto kerää, viilentää, hiljentää ja puhdistaa tuotetut pakokaasut ennen kuin ne johdetaan ulkoilmaan. Tyypillisesti pakoputkisto koostuu pakosarjasta, pakoputkesta, päästöjen hallinta järjestelmästä ja äänenvaimentimesta [1, s. 206; 2, s. 133]. Kuvassa 3 on esitelty tyypillinen ajoneuvon pakoputkisto.



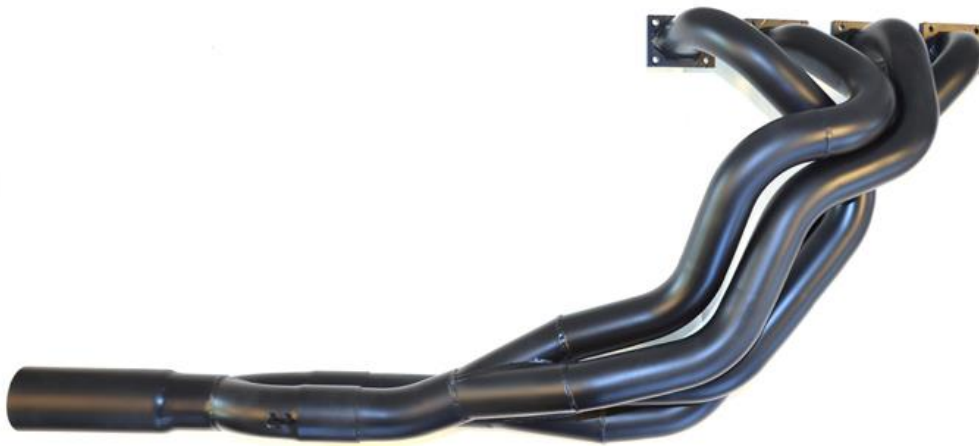
Kuva 3. Pakoputkiston periaatekuva [3]

Pakosarja kiinnittyy tukevasti pulteilla moottorin sylinterikanteen ja kerää useamman sylinterin pulssimaiset pakokaasuvirtaukset yhdeksi virtaukseksi ennen pakoputkea. Rakenteeltaan pakosarja on usein käytävä- tai putkimainen, jotka johdattavat pakokaasut sylinterikannen pakokanavista pakoputkeen, jolla pakokaasut johdetaan eteenpäin järjestelmässä. [2, s. 134]

Eri käyttötarkoituksiin on suunniteltu monenlaisia ja eri materiaaleista valmistettuja pakosarjoja. Usein kuitenkin sarjatuotantona valmistettavissa moottoreissa käytetään valuraudasta valmistettuja melko yksinkertaisia pakosarjoja, massatuotteena saatavan kustannushyödyn takia. Valurautainen pakosarja on esitetty kuvassa 4. Kun taas piensarjoissa tai kilpakäytössä käytetään monesti niin kutsuttua peltipakosarjaa, joka koostuu hitsaamalla yhdistetyistä taivutetuista putkista. Peltipakosarja on esitetty kuvassa 5.



Kuva 4. Yksinkertainen valurautainen pakosarja [4]



Kuva 5. Taivutetuista putkista valmistettu peltipakosarja [5]

Moottorin pyörimisnopeus vaikuttaa pakokaasupulssien esiintymistiheyteen ja etenemisnopeuteen. Pakokaasupulssin jälkeen pakosarjassa on huomattavasti matalampi paine, johon purkautuessaan seuraava pulssi tyhjentää sylinterin tehokkaammin. [2, s. 135] Pakopulssien aiheuttaman alemman paineen voimakkuuteen vaikuttaa suuresti pakosarjan virtauskanavien tai putkien muodot, halkaisijat ja pituudet. Kanavien tai putkien muodoilla, halkaisijoilla ja pituuksilla vaikutetaan pakokaasun virtausnopeuteen ja liike-energian säilymiseen. Näin ollen pakosarjan ominaisuuksilla pystytään tehostamaan sylinterin tyhjenemistä halutulla moottorin pyörimisnopeudella, joka parantaa moottorin hyötysuhdetta. Tässä työssä ei kuitenkaan tämän tarkemmin pakosarjan mitoittamiseen perehdytä.

3. TEORIA

Teoriaosuudessa käydään läpi pakosarjaan vaikuttavien fysikaalisten ilmiöiden teoriaa. Esitellään perusteoriat virtaustapahtumalle, lämmönsiirrolle ja lämpöjännityksille. Tutustutaan CFD-laskennassa yleisesti käytettyyn kontrollitilavuusmenetelmään ja esitellään lyhyesti turbulenssimalleja. Nämä tiedot on kerätty alan kirjallisuudesta.

3.1 Virtaustapahtumaa hallitsevat yhtälöt

Pakokaasujen pulssimainen syntyminen, monihaarisessa pakosarjassa eteneminen, kaasun paineen muutokset ja kokoonpuristuvuus luovat virtaustapahtumasta hyvinkin monimutkaisen.

Virtauksia hallitsevat yhtälöt, jotka tulee toteutua jokaisessa virtaustilanteessa, voidaan johtaa fysiikan lainalaisuuksista. Nämä fysiikan lait ovat massan, liikemäärän ja energian säilymisen perusperiaatteet.

3.1.1 Massan säilyminen (jatkuvuusyhtälö)

Virtaavan aineen massan tulee aina säilyä. Systeemiin sisään virtaavan massan tulee aina olla samansuuruinen kuin systeemistä ulos virtaava massa. Massan säilymistä tarkasteltavissa pisteissä kuvaa jatkuvuusyhtälö. Jatkuvuusyhtälön yleinen kolmiulotteinen muoto on esitelty yhtälössä (1) [6, s. 11-12].

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

Yhtälössä (1) ρ on kaasun tiheys, u on nopeus x-suuntaan, v on nopeus y-suuntaan, w on nopeus z-suuntaan ja ∂x , ∂y , ∂z ovat matkan muutoksia. Ensimmäinen termi kuvaa tiheyden muutosta ajansuhteen ja loput termit kuvaavat massan nettovirtaa tarkastelupisteessä. Tästä nähdään jatkuvuusyhtälön kuvaavan kaasun massan säilymistä kokonaisuudessaan. Kontrollitilavuuden sisään- ja ulosvirtaavien massavirtojen erotus on massan muutos. Jatkuvuusyhtälö pätee seokselle kokonaisuudessaan, eli ei tarkastella yksittäisiä seoksen sisältämiä komponentteja. [6, s. 11-12]

3.1.2 Liikemäärän säilyminen

Newtonin II laki määrää liikemäärän säilymistä. Liikemäärän eli kaasupartikkeliin vaikuttavien voimien summan tulee siis säilyä. Virtauksen liikemäärän säilyminen x-, y- ja z-suunnissa on esitetty kaavoissa (2a-c). [6, s.14-16]

$$\rho \frac{Du}{Dt} = \frac{\partial(-p+\tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial\tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial\tau_{zx}}{\partial z} + S_{Mx} \quad (2a)$$

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = \frac{\partial\tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial(-p+\tau_{yy})}{\partial y} + \frac{\partial\tau_{zy}}{\partial z} + S_{My} \quad (2b)$$

$$\rho \frac{Dw}{Dt} = \frac{\partial\tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial\tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial(-p+\tau_{zz})}{\partial z} + S_{Mz} \quad (2c)$$

Kaavassa (2a) τ_{yx} ja τ_{zx} ovat tarkasteltavan pisteen leikkausjännitys, τ_{xx} on pintajännitys, p on paine ja S_{Mx} on lähde-termi. Termit menevät vastaavasti myös kaavoissa (2b) ja (2c). Lähde-termi käsittää tilavuusvoimat, jotka ovat koko tarkasteltavaan tilavuuteen vaikuttavia voimia eli yleensä virtaustilanteessa ainoastaan painovoima [6, s. 14-16].

Virtaukseen vaikuttavien voimien summa on liikemäärän muutos. Liikemäärän säilymisen yhtälö pätee kaasulle kokonaisuudessaan, eli ei tarkastella yksittäisiä seoksen sisältämiä komponentteja.

3.1.3 Energiayhtälö

Energiayhtälö johdetaan termodynamiikan ensimmäisestä laista eli kaasupartikkelin energia on yhtä suuri, kuin partikkeliin tuotu lämpö ja partikkeliin tehty työ ovat yhteensä. Usein kaasun energia E , joka on esitetty kaavassa (3), määritetään partikkelin sisäenergian ja kineettisen energian summana. [6, s. 16-20]

$$E = E_s + \frac{1}{2}(u^2 + v^2 + w^2) \quad (3)$$

Kaavassa (3) E_s on partikkelin sisäinen energia ja termi $\frac{1}{2}(u^2 + v^2 + w^2)$ on partikkelin kineettinen energia. Kaavassa (4) on esitetty energiayhtälö kokonaisuudessaan, jossa partikkelin energian muutos on kaasupartikkeliin tehdyn työn, partikkeliin lisätyn lämmön ja lähteestä tulevan energian summa. [6, s. 16-20]

$$\rho \frac{DE}{Dt} = \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} + \left[\frac{\partial(u\tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial(u\tau_{yx})}{\partial y} + \frac{\partial(u\tau_{zx})}{\partial z} + \frac{\partial(v\tau_{xy})}{\partial x} + \frac{\partial(v\tau_{yy})}{\partial y} + \frac{\partial(v\tau_{zy})}{\partial z} + \frac{\partial(w\tau_{xz})}{\partial x} + \frac{\partial(w\tau_{yz})}{\partial y} + \frac{\partial(w\tau_{zz})}{\partial z} \right] + \text{div}(k \text{ grad } T) + S_E \quad (4)$$

Kaavassa (4) k on lämmönjohtavuus, T on lämpötila, S_E on lähde-termi.

3.2 Lämmönsiirtoa hallitsevat yhtälöt

Pakosarjan läpi virtaa moni sata asteinen pakokaasu, joka lämmittää ympäröiviä materiaaleja tehokkaasti. Lämpöä siirtyy näin ollen ensin kaasusta pakosarjan kiinteään materiaaliin ja sitten pakosarjasta ympäröivään ilmaan. Lämpö siirtyy myös pakosarjan materiaalissa, sekä pakosarjasta sylinterikanteen ja muihin osiin.

Lämmönsiirto voi tapahtua kahdella tapaa; johtumalla ja säteileillä. Nämä voivat esiintyä yksin tai yhdessä. Seuraavaksi käydään lyhyesti läpi lämmönsiirron teoriaa, joka auttaa ymmärtämään pakosarjassa tapahtuvia lämmönsiirrollisia ilmiöitä.

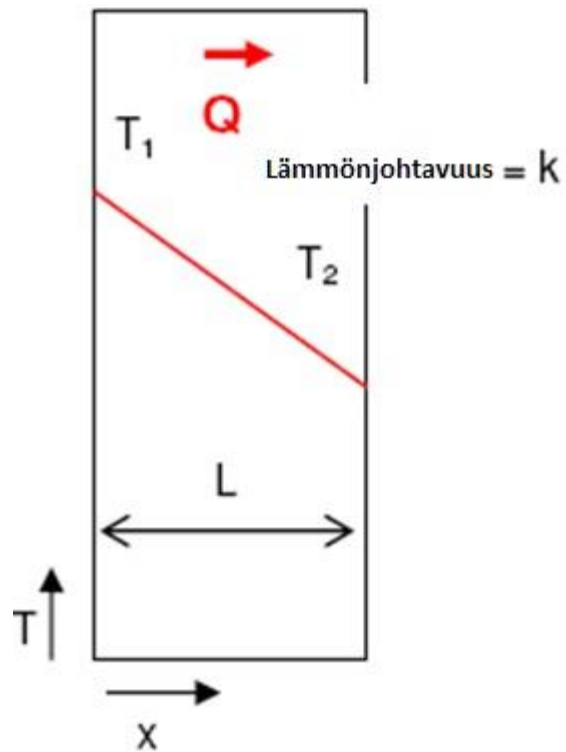
3.2.1 Johtuminen

Lämmönsiirtymistä kutsutaan johtumiseksi, kun lämpö siirtyy materiaalin läpi. Esimerkiksi lämmönsiirtyminen putkessa virtaavasta kuumasta kaasusta putken ulkopintaan, lämmön täytyy läpäistä putken seinämä ja sen materiaali. Lämmönjohtumisen on havaittu riippuvan seuraavista tekijöistä: [7, s. 252-254]

- Pinta-ala, jonka alueelta johtuminen tapahtuu.
- Lämpötilaero, joka on materiaalin pintojen välillä.
- Aika, joka on lämmönsiirrolle annettu.
- Materiaalin paksuus.
- Materiaalin tyyppi.

Eli mitä suurempi pinta-ala ja suurempi lämpötilaero ovat, sitä suurempi on tapahtuva lämmönsiirto. Lämmönsiirto on siis verrannollinen pinta-alaan ja lämpötileroon. Toisaalta, mitä suurempi on materiaalin paksuus, sitä pienempi on tapahtuva lämmönsiirto. Lämmönsiirto on siis kääntäen verrannollinen paksuuteen. [7, s. 252-254]

Esimerkiksi voidaan ajatella seinä, jonka paksuus on x ja jonka pinta ala on A . Samalla olkoon seinän toisen puolen lämpötila t_1 ja seinän vastakkaisen puolen lämpötila t_2 . Kyseinen tilanne on esitetty kuvassa 6.



Kuva 6. Yksinkertainen johtuminen seinän läpi [8]

Nyt oletetaan lämpötilan muuttuvan lineaarisesti seinän läpi. Saadaan siirtyväksi lämmöksi Q , joka on esitetty kaavassa (5). [7, s. 252-254]

$$Q = \frac{kA(t_1 - t_2)}{x} \quad (5)$$

Kaavassa (5) k on materiaalin lämmönjohtavuus, joka on materiaaliominaisuus. Taulukoon 1 on kerätty esimerkinomaisesti tavallisimpien aineiden keskimääräisiä lämmönjohtavuuksia. [7, s. 252-254]

Taulukko 1. Tavallisimpien aineiden keskimääräisiä lämmönjohtavuuksia [7, s. 254]

Aine	Lämmönjohtavuus, W/mK
Ilma, paikallaan (15 C°)	0,025
Alumiini	206
Messinki	104
Tiili, yleinen	0,6
Betoni	0,85
Kupari	380
Korkki	0,043
Huopa	0,038
Lasi	1,0
Lasikuitu	0,04
Valurauta	70
Magnesiumoksidi	0,06
Solumuovi	0,04
Teräs	60
Puu	0,15

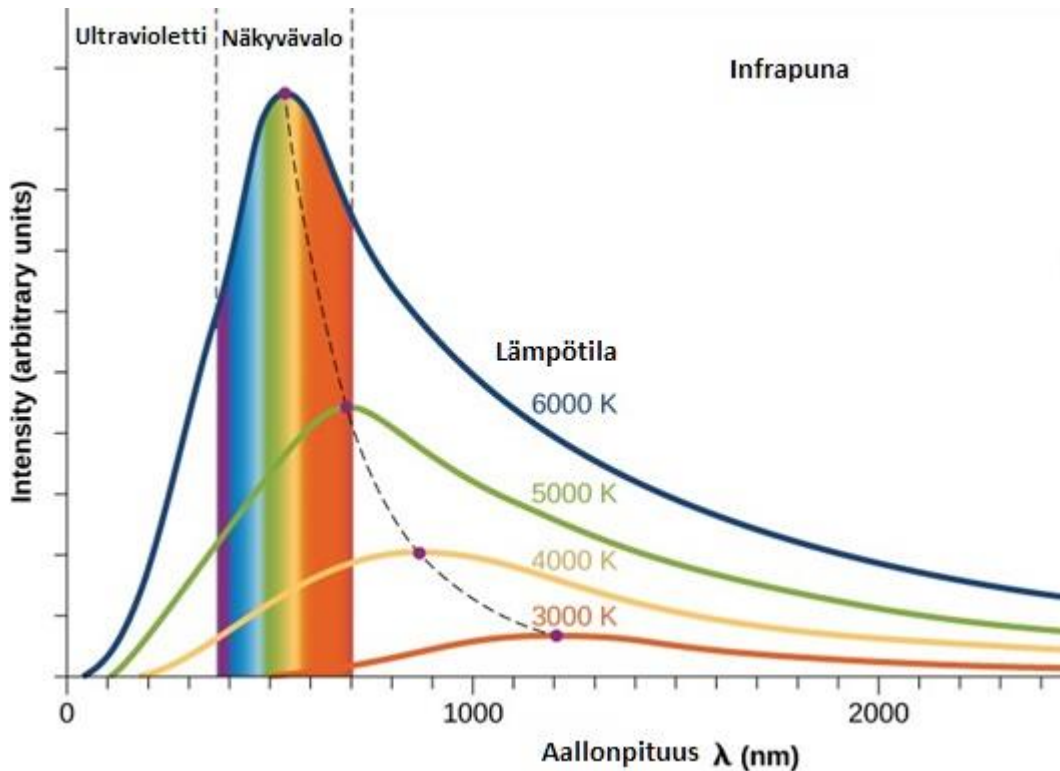
Yhtälöstä (5) nähdään johtumalla siirtyvän lämmön riippuvan lämpötilojen erosta, eikä lämpötilojen suuruuden tasosta.

3.2.2 Säteily

Säteily on elektromagneettinen ilmiö, joka tapahtuu erilaisilla aallonpituuksilla ja se muistuttaa paljon valon siirtymistä. Säteily ei vaadi väliainetta säteilevän ja vastaanottavan pinnan välillä, niin kuin taas johtuminen vaatii. Klassinen esimerkki energian siirtymisestä säteilyllä on aurinko, joka säteilee valtavasti energiaa maahan. [7, s. 261-264]

Johtumisessa siirtyvän lämmön määrä riippuu lämpötilaerosta eikä lämpötilatasosta, mutta säteilyssä säteilevän pinnan lämpötila vaikuttaa suoraan siirtyvän lämmön määrään.

Säteily on pitkälti pintailmiö ja se tapahtuu laajalla aallonpituusalueella. Kuvassa 7 on esitetty eri lämpötiloissa olevan mustan kappaleen lämpösäteilyn voimakkuuden käyriä aallonpituuden funktiona. Mustakappale on täydellinen energian säteilijä. [7, s. 261-264]



Kuva 7. Mustan kappaleen spektromagneettinen käyrä [9]

Kuvassa 7 käyrän korkeus kuvaa säteilyn määrää ja yleinen muoto kuvaa säteilyenergian ominaisuutta. Eri käyrät kuvaavat eri lämpötiloissa tapahtuvaa säteilyä. Alemmilla lämpötiloilla säteilyssä esiintyvät alimmat aallonpituudet siirtyvät pidemmille aallonpituuksille. [7, s. 261-264]

Korkeammilla lämpötiloilla, yli $800\text{ }^{\circ}\text{C}$, säteily tapahtuu näkyvän valon aallonpituus alueella (10^{-6} - 10^{-7} m). Alemmilla lämpötiloilla, alle $800\text{ }^{\circ}\text{C}$, säteily on pelkästään infrapuna-alueella (10^{-2} - 10^{-6} m). [7, s. 261-264] Tästä johtuen esimerkiksi kuuma metalli alkaa ns. hehkua, kun lämpötila nousee tarpeeksi korkealle ja säteilyn aallonpituus siirtyy näkyvän valon aallonpituusalueelle.

Jos kappale säteilee energiaa mustankappaleen aallonpituus spektrillä, mutta vain murto-osalla tehosta, kutsutaan kappaletta harmaaksi kappaleeksi. Musta ja harmaa eivät kuvaa kappaleen varsinaista väriä, vaan säteilijän tehokkuutta. Mustakappale on täydellinen säteilijä, harmaa kappale ei ole täydellinen säteilijä. [7, s. 261-264]

Täydellisen mustan kappaleen säteilevän energian määrää q voidaan kuvata Stefan-Boltzmannin lailla. Stefan-Boltzmann laki on esitetty kaavassa (6) [7, s. 261-264].

$$q = \sigma T^4 \quad (6)$$

Kaavassa (6) σ on Stefanin vakio ja suuruudeltaan $5,6697 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{K}^4$ ja T on lämpötila Kelvineinä. Lämpöteho Q pinta-alayksikköä kohden voidaan laskea kaavasta (7) [7, s. 261-264].

$$Q = \sigma T^4 A \quad (7)$$

Jossa A on pinta-ala neliömetreinä (m^2).

Harmaalle kappaleelle, jolla on emissiokerroin ε , Stefan-Boltzmannin yhtälö tulee kaavassa (8) esitettyyn muotoon [7, s. 261-264].

$$Q = \varepsilon \sigma T^4 A \quad (8)$$

Emissiokerroin, ε , vaihtelee pintalämpötilan ja materiaalin pinnan laadun mukaan. Taulukossa 2 on esitetty esimerkinomaisesti tavallisimpien aineiden keskimääräisiä emissiokertoimia. [7, s. 261-264]

Taulukko 2. Emissiokertoimia [7, s. 264]

Aine	Emissiokerroin
Alumiini	0,25
Tiili	0,93
Hiili	0,85
Kromi	0,4
Kupari, hapettunut	0,7
Kupari, kiillotettu	0,02
Lasi	0,94
Teräs, hapettunut	0,7
Teräs, kiillotettu	0,15
Maali, kaikki värit	0,85
Vesi	0,95

Yleisesti erittäin kiiltävällä pinnalla on huono emissiokerroin, kun taas karhealla ja hapettuneella pinnalla on paljon korkeampi emissiokerroin. Eli kiiltävä pinta säteilee heikommin kuin karhea pinta.

3.2.3 Konvektio

Lämpötilaero nesteen ja kiinteän pinnan välillä saa aikaan konvektion. Konvektioksi kutsutaan lämmönsiirtymistä kiinteästä pinnasta (tai pintaan) liikkuvaan nesteeseen johtumalla tai säteilyllä. Nesteen tiheys muuttuu lämmönsiirtymisen seurauksena ja tämä

aiheuttaa nesteen liikkeen, joka tehostaa lämmönsiirtymistä, tätä kutsutaan luonnolliseksi konvektioksi. [7, s. 266-267].

Kun halutaan tehostaa lämmönsiirtoa konvektiolla, lisätään virtausta pumpuilla ja puhaltimilla, kutsutaan tätä pakotetuksi konvektioksi. Useimmissa moottoreissa ja lämmitysjärjestelmissä on pumppu jäähdytyspiirissä aikaansaamassa konvektiovirtauksia ja tehostamassa jäähdytystä.

Konvektio tapauksen ratkaiseminen on huomattu olevan hyvinkin haastavaa. Lämmönsiirto kuumasta lähteestä nesteeseen tai kaasuun riippuu monesta tekijästä:

- Nesteen tai kaasun virtauksen suunta seinään nähden.
- Nesteen tai kaasun ominaisuuksista.
- Pinnan ominaisuuksista.
- Nesteen tai kaasun virtauksen nopeudesta seinään nähden.
- Nesteen tai kaasun turbulenssista.
- Nesteen tai kaasun olomuodon muuttumisesta (nesteestä kaasuksi tai kaasusta nesteeksi).
- Onko pakotettu vai luonnollinen virtaus.

Konvektio on energian siirtoprosessi, koska nesteeseen tai kaasuun siirretty lämpö siirtyy konvektiovirtausten mukana toiseen paikkaan nesteen tai kaasun kierrossa. [7, s. 266-267].

3.3 Lämpöjännitykset

Lämpöjännitys on jännityksen muodostumista lämpötilan vaikutuksesta. Kun materiaalilla on lämpötilajakauma, sen eri osat laajenevat eri määrän aiheuttaen jännitystä materiaalin sisällä. Lämpöjännitys voi esiintyä myös tasalämpöisessä kappaleessa: [10, s. 1-4]

- Jos vapaa lämpölaajeneminen on estetty ulkoisilla kiinnityksillä.
- Jos kappale sisältää useampaa materiaalia eri laajenemiskertoimilla.
- Jos materiaalin mikrorakenne on heterogeeninen.

Kun lämpöjännitys syntyy äkillisestä lämpötilan muutoksesta, puhutaan lämpöshokista. Äkillinen muutos ympäristön lämpötilassa tai sisäinen lämmöntuotto ovat esimerkkejä lämpöshokista. Vaikkakin lämpöshokin jännitykset määritetään myös lämpötilajakaumalla, ovat nämä jännitykset usein suurempia kuin hitaasta lämmityksestä tai jäähdytyksestä aiheutuvat jännitykset. Toinen ero perinteisen lämpöjännityksen ja lämpöshokin aiheuttaman jännityksen välillä on se, että lämpöshokki aiheuttaa jännityksen hyvin nopeasti. Jotkin materiaalit haurastuvat nopeasta jännityksen muutoksesta ja siksi eivät välttämättä kestä lämpöshokin aiheuttamaa jännitystä, jonka ne muuten kestäisivät hitaasti altistettuna. [10, s. 1-4]

Materiaalin yksinkertainen pituuden muutos (ΔL) lämpötilanvaikutuksesta on esitetty kaavassa (9) [10, s. 51]

$$\Delta L = \frac{1}{A} \int \alpha T dV \quad (9)$$

A on poikkipinta-ala, α on materiaalin laajenemiskerroin, T on lämpötila. Lämpötilamuutoksesta aiheutuvat jännitykset voidaan ratkaista kaavoissa (10a-c) esitetyllä tavalla. [10, s. 23]

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} = -\frac{\partial}{\partial x} \left(-\frac{E\alpha T}{1-2\mu} \right) = \frac{E\alpha}{1-2\mu} \frac{\partial T}{\partial x} \quad (10a)$$

$$\frac{\partial \sigma_y}{\partial y} = \frac{E\alpha}{1-2\mu} \frac{\partial T}{\partial y} \quad (10b)$$

$$\frac{\partial \sigma_z}{\partial z} = \frac{E\alpha}{1-2\mu} \frac{\partial T}{\partial z} \quad (10c)$$

Kaavoissa (10a-c) E on materiaalin kimmokerroin, μ on Poisson vakio, σ_x , σ_y ja σ_z ovat x, y ja z suuntaiset jännitykset.

3.4 Kontrollitilavuusmenetelmä

Virtauslaskennassa osittaisdifferentiaaliyhtälöiden numeeriseen ratkaisuun on kehitetty useita menetelmiä. Yleisin käytetty ratkaisumenetelmä virtauslaskentaohjelmistoissa on kontrollitilavuusmenetelmä (Finite Volume Method). [6, s. 3]

Kontrollitilavuusmenetelmä perustuu kontrollitilavuuksien käyttöön, mikä mahdollistaa rakenteettomien verkkojen käytön. Tällä menetelmällä on monia etuja:

- Taseiden toteutuminen (massa, liikemäärä jne.)
- Iteratiiviset menetelmät pitkälle kehitettyjä
→ nopea ja tehokas laskenta suurissa laskentaverkoissa
- Hyvä turbulenteille virtauksille ja suurille lähdetermeille

Menetelmän haittoihin voidaan lukea mahdollisuus suureen numeeriseen diffuusioon alemman kertaluokan diskretoinneilla eli osittaisdifferentiaaliyhtälöiden muuntamisella diskreeteiksi yhtälöiksi. [6, s. 5]

Diskretointi kontrollitilavuusmenetelmässä tapahtuu jakamalla laskenta-alue kontrollitilavuuksiin ja hallitsevat yhtälöt integroidaan kontrollitilavuuden yli ja käytetään Gaussin divergenssiteoremaa. Jatkuvista yhtälöistä siirrytään yhtä laskentakoppia kuvaaviin yhtälöihin. [6, s. 25]

Jokaisen kontrollitilavuuden keskipisteessä on solupiste (Node) joita rajaavat kontrollitilavuuden reunat (Control Volume Faces). Tulosten tarkkuus riippuu suuresti

numeerisesta menetelmästä kontrollitulavuuksien reuna-arvojen arvioinnissa. Näiden reuna-arvojen arviointiin on kehitetty useita erilaisia menetelmiä, joihin ei tässä työssä sen tarkemmin tutustuta. Diskretoinnin tuloksena saatu algebrallisten yhtälöiden ryhmä ratkaistaan iteratiivisesti. [6, s. 134]

3.5 Turbulenssimalli

Turbulenssi on kolmiulotteista ja satunnaista aikariippuvaa liikettä. Turbulenssin mittaskaaloja on virtausgeometrian suurista mitoista pienimpiin Kolmogorovin mikroskaaloihin saakka. Mitä suurempi Reynoldsin luku, sitä pienempiä skaaloja virtauksesta löytyy. [6, s. 41-43]

Tarkka ratkaisu (direct numerical simulation, DNS) vaatii kaikkien kolmen dimension yhtälöiden ja aikariippuvuuden laskennan. DNS vaatii pienimpien pituusskaalojen luokkaa olevan kontrollitulavuuden koon, muuten gradientteja ei voida ratkaista numeerisesti. Aika-askeleen on oltava myös pienimpien aikaskaalojen luokkaa, muuten ajan suhteen tapahtuvia muutoksia ei voi ratkaista. [6, s. 110]

Edellä mainituista syistä DNS-laskentaa on tehty pääasiassa pienillä laskenta-geometrioilla ja matalilla Reynoldsin luvuilla. Tietokoneiden laskentateho ei vielä riitä teollisen kokoluokan ja tarvittavan suuruisilla Reynoldsin luvuilla laskemiseen.

Laskenta-algoritmit ja tietokoneet kehittyvät kuitenkin koko ajan ja tulevaisuudessa tarkka laskenta varmasti yleistyy. Laskentaa voidaan jo nopeuttaa kahdella menetelmällä:

- LES (Large Eddy Simulation)
- RANS (Reynolds Averaged Navier Stokes)

LES on edelleen ajasta riippuva laskenta, mutta ainoastaan suurten pyörteiden skaalat lasketaan tarkasti ja pienimmät skaalat mallinnetaan. RANS-laskennassa yhtälöt aikakeskiarvotetaan ja yhtälöistä ratkaistaan keskiarvokenttä. Turbulenssin vaikutus keskiarvokentässä lasketaan kokonaan malleihin perustuen. Mallit sisältävät aina oletuksia ja yksinkertaistuksia, mikä luonnollisesti vaikuttaa tulosten tarkkuuteen. [6, s. 66, 106]

Turbulenssimalli viittaa yleensä RANS-laskennassa käytettäviin turbulenssin alimalleihin, joilla turbulenssin vaikutus keskiarvokenttään lasketaan. LES on täysin poikkeava laskentamenetelmä RANS:iin verrattuna ja siinä käytetään omia turbulenssimalleja pienten skaalojen laskentaan. Vaikka LES on oma laskentamenetelmänsä, usein kuitenkin sen sanotaan olevan turbulenssimalli.

Käytännön sovelluksissa yleisimmin käytetty turbulenssimalli on k - ϵ -malli. k - ϵ -mallin etuna on kohtuullinen yksinkertaisuus. Se on hyvin yleispätevä, koska turbulentin viskositeetin arvo vaihtelee siinä virtauksen eri alueilla aivan kuten todellisuudessaakin. Sen

huonona puolena on, että turbulenssi oletetaan isotrooppiseksi, eli suunnasta riippumattomaksi. Oletus on epätarkka voimakkaasti pyörivissä virtauksissa.

Turbulentti viskositeetti μ_t lasketaan käyttäen turbulenssin kineettistä energiaa ja kineettisen energian dissipaatiota, joka on esitetty kaavassa (11). [6, s. 75]

$$\mu_t = \bar{\rho} C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (11)$$

Kaavassa (11) k on turbulenssin kineettinen energia massayksikköä kohti, ε on kineettisen energian dissipaationopeus massayksikköä kohti ja C_μ on mallivakio, joka on johdettu useisiin mittauksiin perustuen. k ja ε lasketaan omista osittaisdifferentiaaliyhtälöistään, jolloin turbulenssin kineettisen energian ja dissipaation jakauma saadaan ratkaistua virtauksen eri alueilla. k ja ε siirtoyhtälöt voidaan johtaa lähtemällä Navier-Stokesin yhtälöistä.

Standardi k - ε -mallista on johdettu useita versioita, esimerkiksi Realizable k - ε , joissa on käytännössä tehty pieniä muutoksia yhtälöiden termien mallinnuksessa ja mallivakioissa.

Realizable k - ε -malli eroaa standardi k - ε -mallista kahdella tapaa. Realizable k - ε -mallissa turbulentissa viskositeetissä μ_t käytetään C_μ :tä muuttujana, eikä standardimallin mukaisena mallivakiona. Siirtoyhtälö kineettisen energian dissipaationopeudelle poikkeaa myös standardimallista. Realizable k - ε -malli tarjoaa parempaa ennustavuutta erityisesti suuttimien ulosvirtauksissa eli suihkuissa.

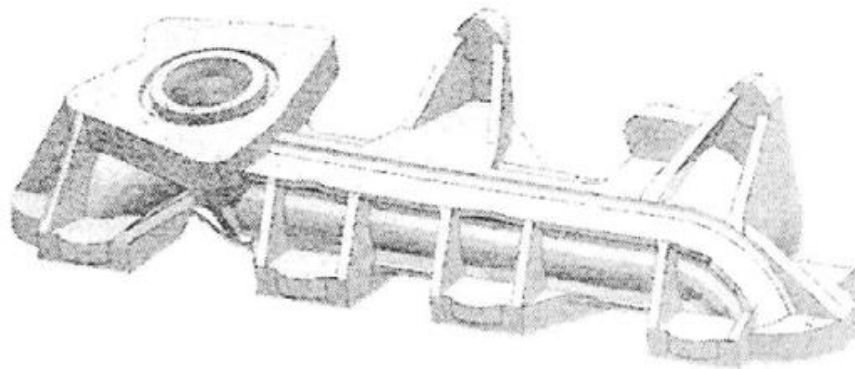
4. KATSAUS AIEMPIIN TUTKIMUKSIIN

Tässä luvussa tutustaan kahteen aikaisemmin julkaistuun artikkeliin, joissa on tutkittu pakosarjan vaurioitumisia mahdollisten lämpöjännitysten seurauksena. Molemmissa tutkimuksissa on hyödynnetty simulointia.

Ensimmäisenä käydään läpi artikkeli [11], (Thermo-Mechanical Analysis of an Automotive Diesel Engine Exhaust Manifold), jossa esitetään auton nelitahtisen dieselmoottorin pakosarjan lämpöjännitys analyysi [11]. Toisena käydään läpi artikkeli [12], (Effect of Fin Attachment On Thermal Stress Reduction of Exhaust Manifold of an Off Road Diesel Engine), jossa tutkitaan työkonen dieselmoottorin pakosarjan lämpöjännitysten vähentämistä geometrisilla muutoksilla [12].

4.1 Lämpöjännitys analyysi auton dieselmoottorin pakosarjalle

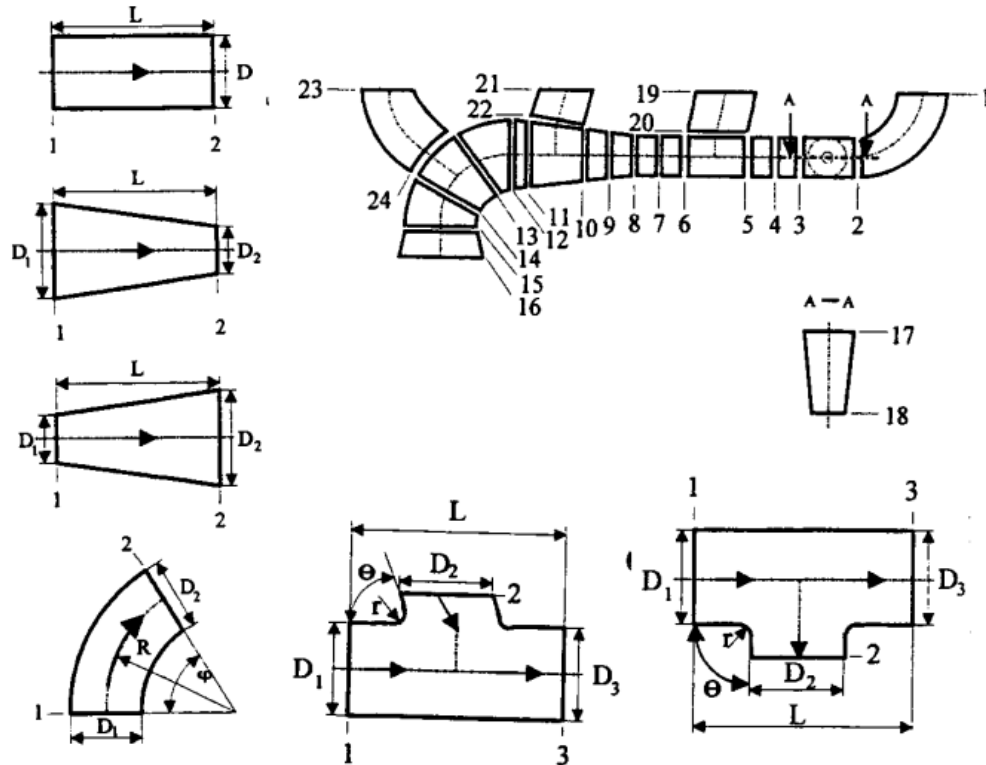
Lähteessä [11] tutkitaan lämpöjännityksiä kuvan 8 mukaisesta pakosarjasta. Kohteena on turboahdetun nelisylinterisen auton moottorin pakosarja.



Kuva 8. Turboahdetun nelisylinterisen moottorin pakosarja [11]

Kirjoittajat keskittyvät artikkelissaan kuvaamaan oikein aikariippuvaista lämmönsiirtoa kuumen kaasun puolelta. He käyttävät yksinkertaista, mutta tehokasta tapaa, joka on kehitetty laskemaan näennäisaikariippumatonta lämmönsiirtoa ja kaasun lämpötilaa pitkin pakosarjan kaasupatjaa. Tapa perustuu kytkettyyn 1-D kaasu virtaukseen ja 3-D lämpö-analyysiin elementtimenetelmällä. [11]

Työssä siis suoritettiin pakokaasun virtauslaskenta hyvin yksinkertaisesti jakamalla pakosarjan kanavat pieniin standardi muotoihin, kuten kuvassa 9 on esitetty.



Kuva 9. Pakosarjan kanavat jaettuna yksinkertaisiin standardi muotoihin [11]

Lähteessä [11] tarkastellaan kuinka moottorin työkierto vaikuttaa pakokaasujen virtaukseen ja sitä myöden lämmönsiirtoon. He toteavatkin pakokaasun lämpötilavaihtelun työkierron aikana vaikuttavan huomattavasti vähemmän lämmönsiirtoon kuin pakokaasupulssista johtuva massavirran vaihtelu. Pakoventtiilin ollessa kiinni massavirtaa ei käytännössä ole ja tällöin ei myöskään konvektiivista lämmönsiirtoa esiinny. [11]

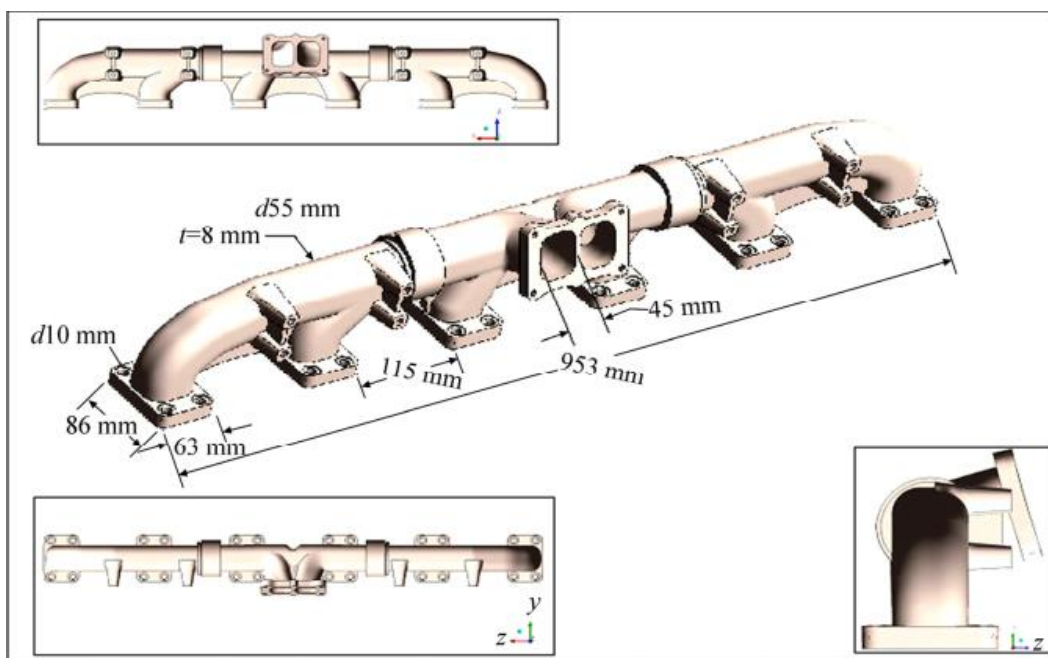
Jännitysanalyysissä he toteavat kaikkien muiden ulkoisten voimien voitavan jättää huomioita, paitsi pakosarjan kiinnityspulttien aiheuttamat voimat. He ovatkin simuloinneissaan ottaneet huomioon pakosarjan kiinnitystavan sylinterikanteen ja sen lisäksi myös pakosarjan ja sylinterikannen väliin tulevan tiivisteeseen, jonka puristuskäyttäytyminen on epälineaarista. [11]

Simuloinnin tuloksena pakosarjasta löytyy jännityskeskittymä, joka aiheuttaisi pakosarjan vaurioitumisen. He toteavat myöskin, etteivät suurimmat jännitykset esiinny moottorin jatkuvan kuormituksen tilassa, jolloin pakosarjan lämpötila on tasaantunut. Pahimmat

jännitykset esiintyvät pakosarjan lämpenemisvaiheessa, jolloin pakosarjan ulko-osat ovat vielä suhteellisen viileitä verrattuna pakosarjan sisäosiin. [11]

4.2 Tukiripojen vaikutus pakosarjan lämpöjännitysten vähentämisessä

Toisessa artikkelissa [12] tutkitaan, millainen vaikutus erilaisilla vahvikkeilla on pakosarjan lämpöjännityksiin. Tutkittavana kohteena on Komatsun työkonene kuusisylinterisen dieselmoottorin pakosarja, joka on esitetty kuvassa 10. [12]

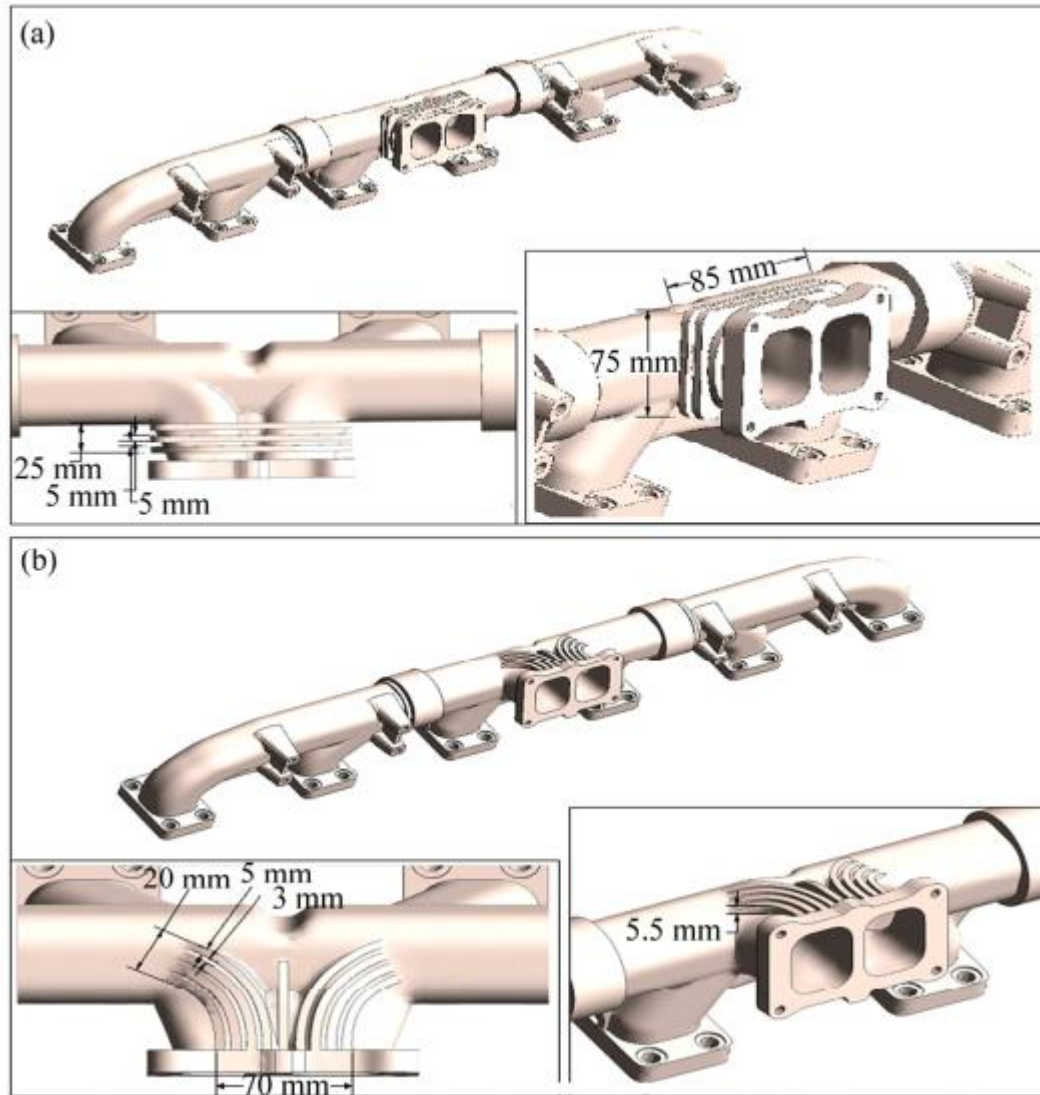


Kuva 10. Komatsun kuusisylinterisen dieselmoottorin pakosarja [12]

Tutkimuksessa on ensin simuloitu pakokaasun virtaus pakosarjassa annetuilla nopeuden, paineen ja lämpötilan arvoilla. Tähän on käytetty tasaista virtausnopeutta jokaiselle sylinterille samanaikaisesti ja saatu virtauksen lämpötilajakauma. Virtauksen lämpötilajakauma on siirretty pakosarjan kanavien seinämille, simuloitu lämmön johtuminen materiaalissa ja näin saatu pakosarjan materiaalin lämpötilajakauma, josta on edelleen simuloitu lämpöjännitykset. [12]

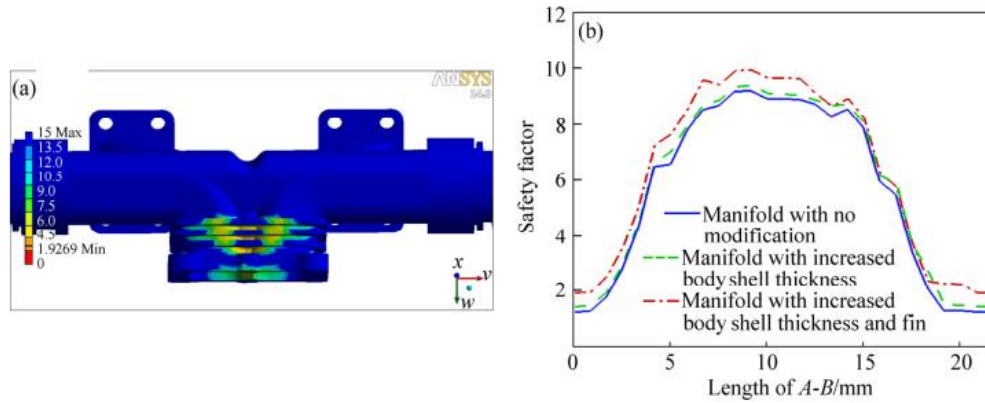
Myöskin tämän artikkelin kirjoittajat tulevat siihen tulokseen etteivät, pakosarjan ulkoiset voimat tai värinät vaikuta niin suuresti pakosarjan kestävyYTEEN kuin lämpöjännitykset [12]. He eivät kuitenkaan ota huomioon jännitysten simuloinnissa pakosarjan kiinnityksiä.

Pakosarjan rakenteeseen he ovat testanneet kahdenlaisia tukiripoja. Tukirivat on esitetty kuvassa 11. Ensimmäiset tukirivat ovat pakosarjan virtauskanavien suuntaa vastaan kohtisuorassa ja toiset tukirivat myötäilevät pakosarjan virtauskanavien suuntaa. Tukiripojen lisäksi on testattu pakosarjan seinämävahvuuden kasvattamista.



Kuva 11. Pakosarjassa testatut kahdenlaiset tukirivat [12]

Tukirivoilla ja seinämävahvuuden kasvattamisella lämpöjännitysten keston varmuuskeroi kasvoi merkittävästi. Varmuuskertoimesta kertova kuvaaja ja varmuuskertoimet geometriassa on esitetty kuvassa 12. [12]



Kuva 12. Varmuuskertoimesta kertova kuvaaja ja varmuuskertoimet geometriassa [12]

Pelkällä pakosarjan seinämävahvuuden kasvattamisella ei saavutettu juurikaan parannusta kestävyYTEEN. Josta johtopäätelmänä todetaan geometrisen muodon vaikuttavan kestävyYTEEN enemmän kuin materiaalivahvuuden. [12]

5. TARKASTELTAVA PAKOSARJA JA KÄYTETTÄVÄT LÄHTÖTIEDOT

Tässä diplomityössä tarkastellaan simuloimalla Agco Power Oy:n valmistaman kuusisylinterisen ahdetun työkonedieselmoottorin valurautaisen pakosarjan lämpöjännityksiä. Yrityksen valmistamia moottoreita käytetään monissa maatalous- ja työkoneissa, esimerkiksi kuvassa 13 esitetyssä Valtran BE 1035e sokeriruokopuimurissa. Työn kohteeksi valikoidussa pakosarjassa on havaittu esiintyvän vaurioita moottorijarrupenkissä ajettavissa rasiustesteissä, mutta toistaiseksi vaurioita ei ole havaittu ajoneuvoihin asennetuissa moottoreissa koneiden tyypillisessä käytössä.



Kuva 13. Valtran BE 1035e sokeriruokopuimuri, jossa käytetään Agco Power Oy:n valmistamaa dieselmoottoria [13]

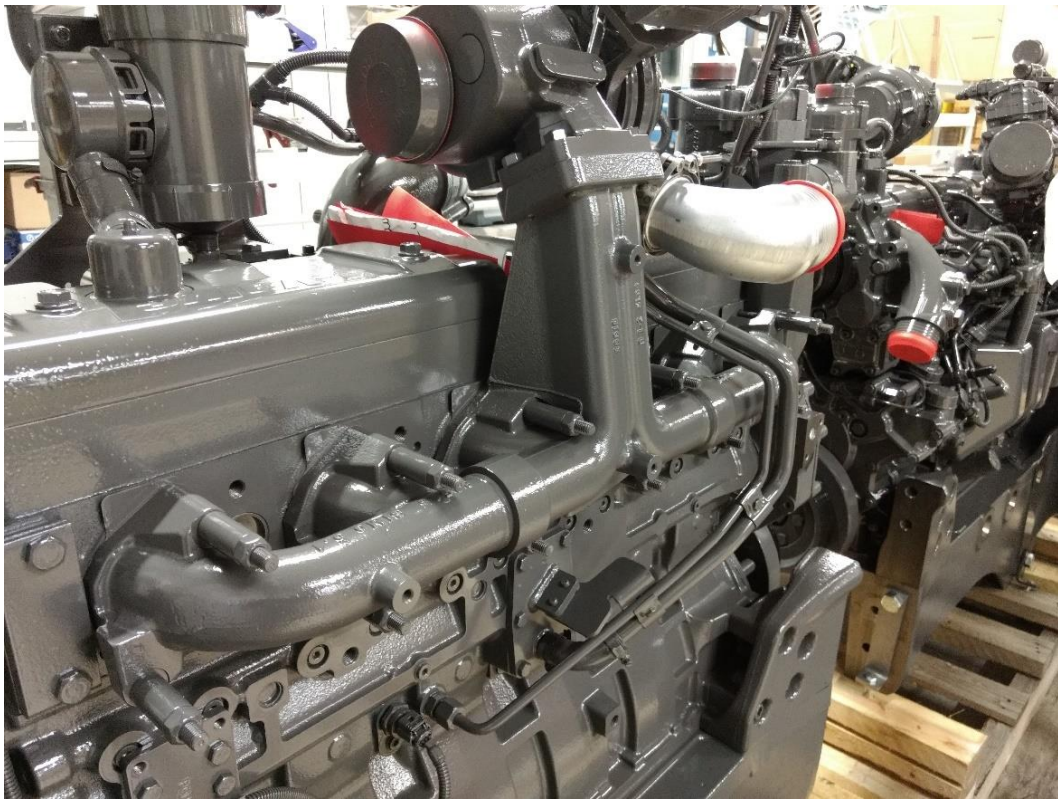
Rasiustestistä kerättyjä mittaustuloksia käytetään lähtökohtaisesti lähtöarvoina simuloinnissa. Mittaustuloksia on kerätty suhteellisen laajasti, mutta ei varsinaisesti tähän simulointitapaukseen liittyen. Tästä johtuen osaa kerätystä tiedosta joudutaan hieman soveltamaan.

Seuraavaksi tässä luvussa käydään läpi tarkemmin tarkastelun kohteena oleva pakosarja ja lähtöarvoina käytettävät mittaustulokset siltä osin kuin ne voidaan julkisesti esittää.

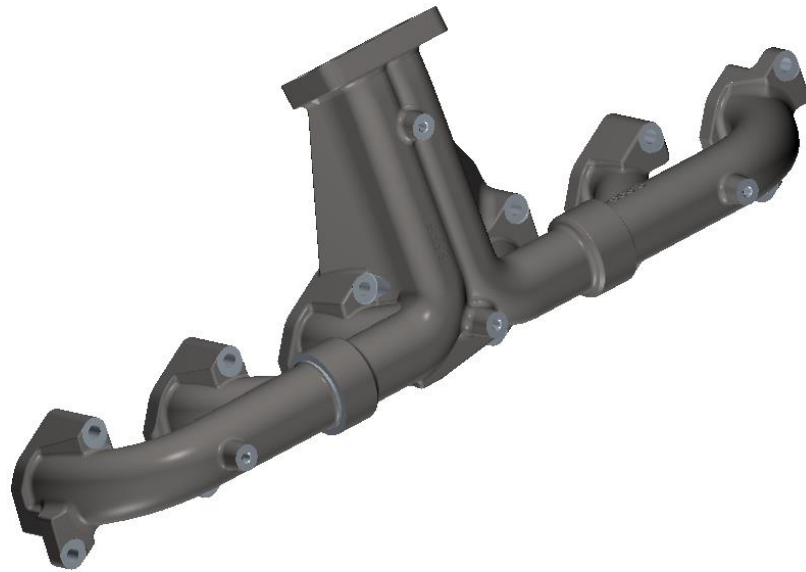
Pakosarja esitellään kuvin, sekä 3D-mallista, että oikeasta moottorista ja mittausdata esitellään kuvaajin ja taulukoin.

5.1 Tarkasteltava pakosarja

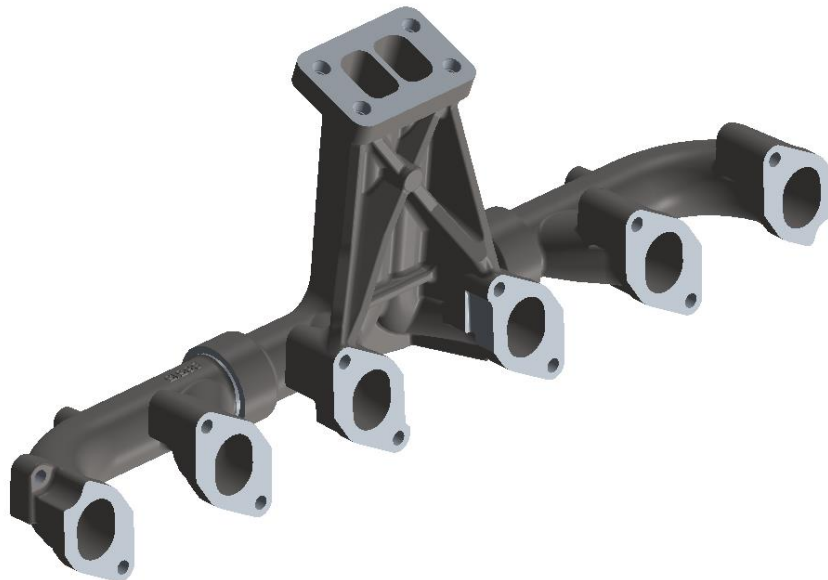
Tutkittava pakosarja on kuusisylinterisen ahdetun dieselmoottorin valurautainen pakosarja ja tämä sijoittuu moottorissa sylinterikannen ja turboahtimen väliin. Pakosarja moottoriin kiinnitettynä on esitetty kuvassa 14. Turboahdin on tässä kyseessä olevassa sovelutuksessa sylinterikannen yläpuolella ja pituussuunnassa keskellä moottoria. Pakosarjan 3D-malli on havainnollistettu tarkemmin kuvissa 15, 16 ja 17.



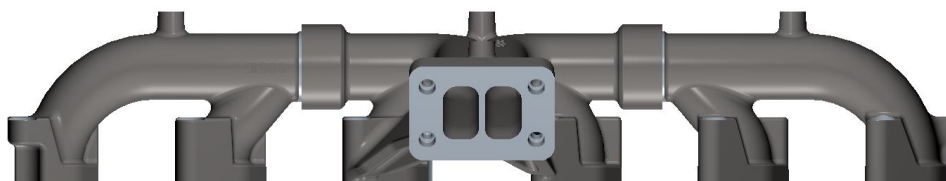
Kuva 14. Pakosarjasta moottoriin kiinnitettynä



Kuva 15. Havainnolistava kuva pakosarjan 3D-mallista

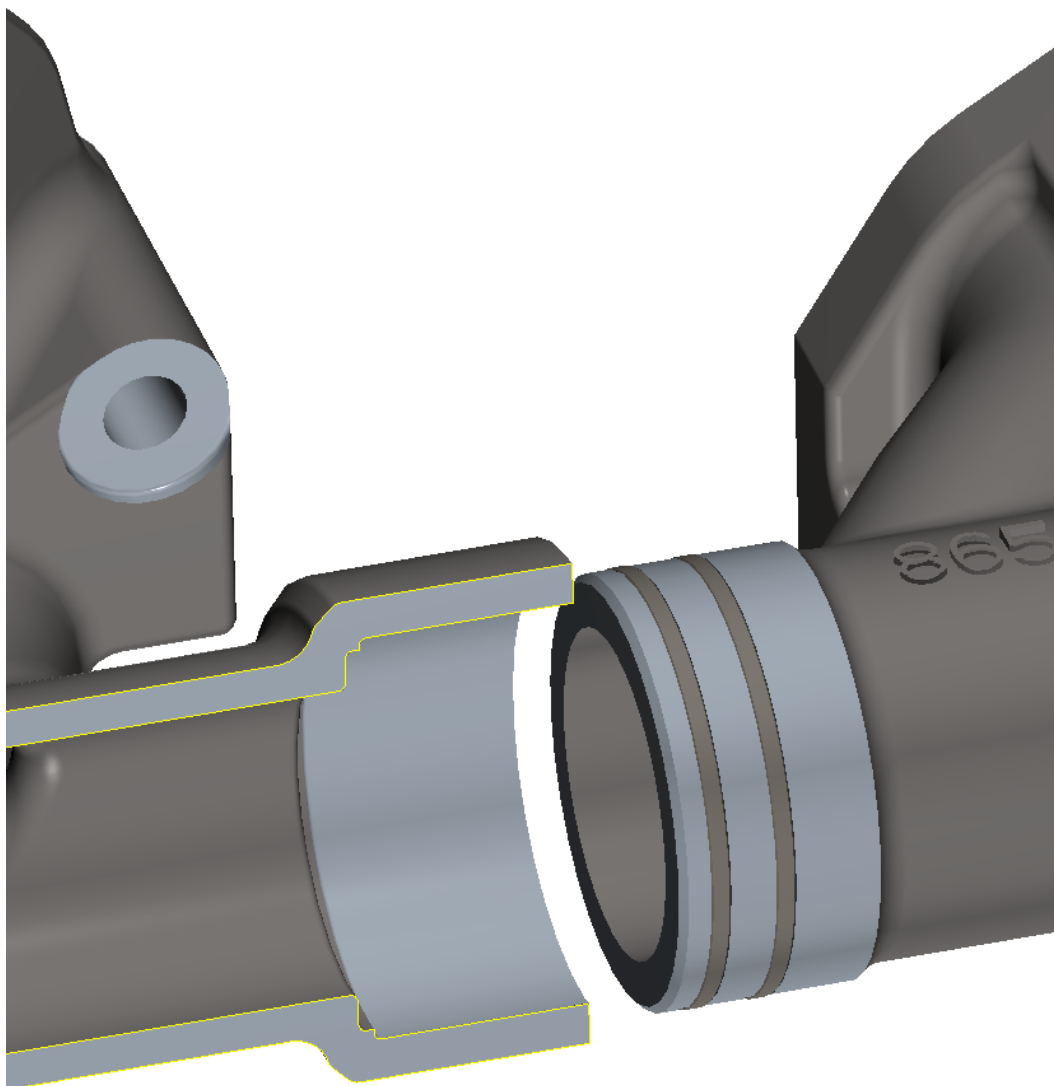


Kuva 16. Havainnolistava kuva pakosarjan 3D-mallista sylinterikannen puolelta



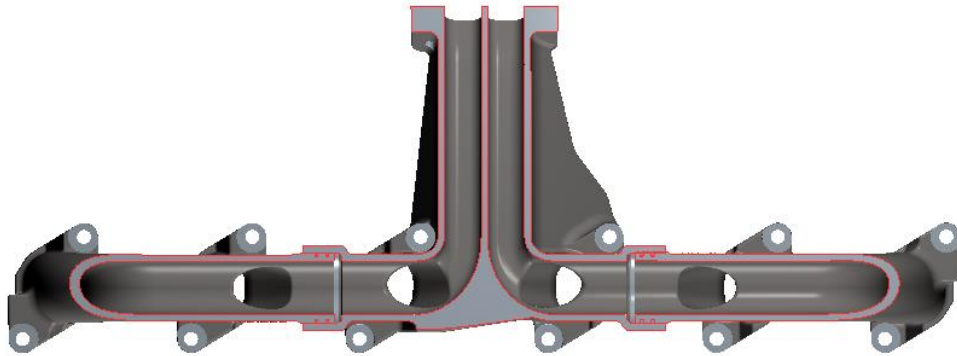
Kuva 17. Havainnollistava kuva pakosarjan 3D-mallista ylhäältäpäin

Pakosarja on rakenteeltaan kolmiosainen ja tyypiltään niin kutsutusti 2+2+2 eli kahden sylinterin pakokanavista tulee pakokaasut yhteen pakosarjan rakenteelliseen osaan. Päätyosat ovat keskenään identtiset ja voidaan näin käyttää kummassa tahansa päässä pakosarjaa. Kiinnitys sylinterikanteen tapahtuu pakokanavakohtaisesti kahdella pitkällä vaarnaruuvilla. Pakosarjan osien välinen liitos on toteutettu sylinterimäisesti limittämällä ja tiivistetty tiivisterenkain. Tällainen liitos mahdollistaa pienen liikkeen pakosarjan osien välillä. Pakosarjan osien välisen liitoksen periaate on esitetty kuvassa 18.

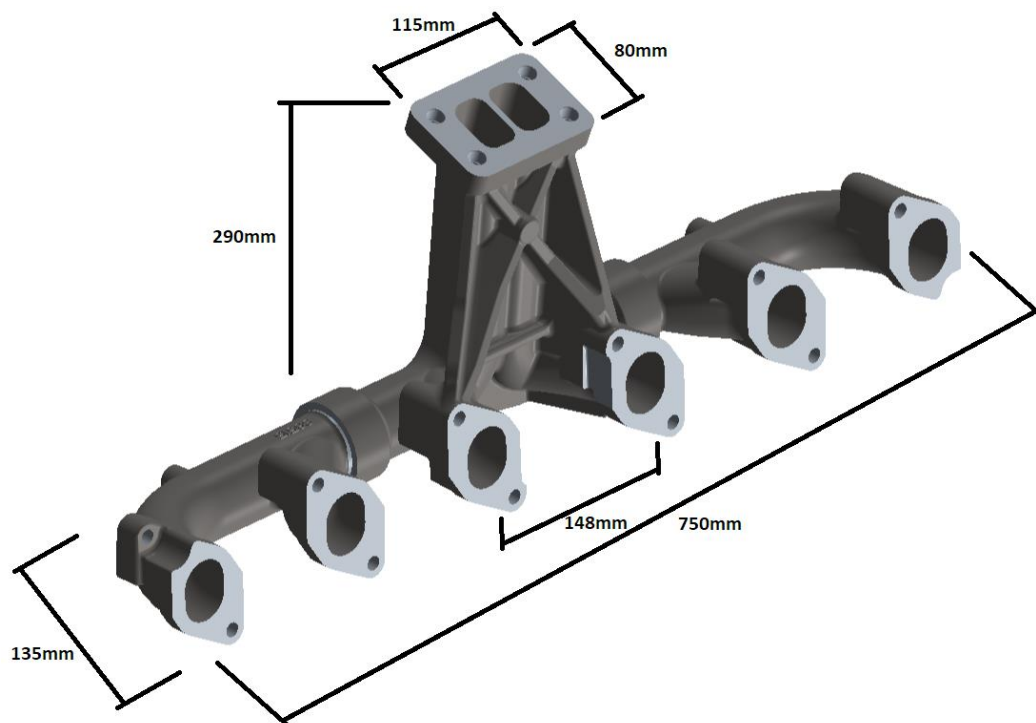


Kuva 18. Pakosarjan osien välisen liitoksen periaate

Moottorissa käytetään twin scroll -turboahdinta ja tämän takia pakosarjan virtauskanavisto on jaettu kahteen erilliseen osaan, joissa pakokaasut virtaavat turboahtimelle erikseen kolmesta ensimmäisestä sylinteristä ja kolmesta viimeisestä sylinteristä. Tämä mahdollistaa kuusisylinterisen rivimoottorin luonteen ansiosta sen, etteivät peräkkäiset pakokaasupulssit tule samaan pakosarjan virtauskanavaan. Erilliset virtauskanavistot on havainnollistettu poikkileikkauskuvalla kuvassa 19. Pakosarjan kokoluokka ja päämitat on havainnollistettu kuvassa 20.



Kuva 19. Pakosarjan poikkileikkaus ja virtauskanavat



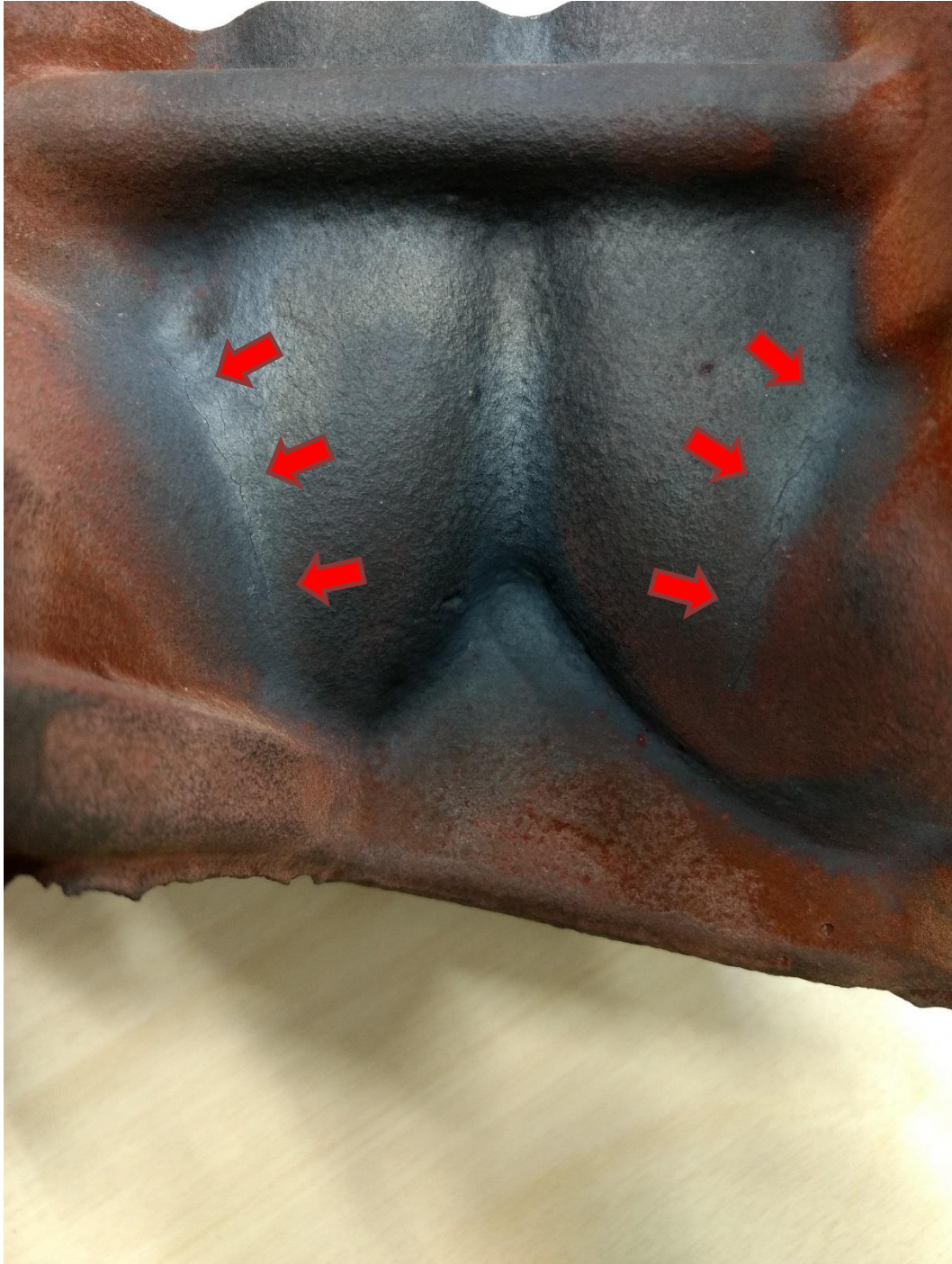
Kuva 20. Pakosarjan päämitat

5.1.1 Pakosarjan vauriot

Pakosarjassa on havaittu moottorijarrussa ajettujen rasiustestien jälkeen vaurioita. Nämä vauriot ovat esiintyneet nimenomaan pakosarjan keskimmaisessä osassa, johon myöskin tämän työn tarkastelu pitkälti keskittyy. Keskiosassa on suhteellisen tukevat

jäykisterakenteet, koska pakosarjan pitkälle ylös nousevan kaulaosan tulee kannatella suhteellisen painavaa turboahdinta.

Syntyneet vauriot esiintyvät jäykisterakenteiden välissä, sekä keskiosan sylinterikohtaisten ensiöputkien sisämutkissa. Vauriot on esitetty kuvissa 21, 22 ja 23.



Kuva 21. Syntyneet vauriot ensiöputkien sisämutkissa

Kuvasta 21 nähdään syntyneet vauriot sylinterikohtaisten ensiöputkien sisämutkissa. Vaurioitunutta osaa tarkasteltaessa huomattiin sisämutkiin syntyneiden vaurioiden olevan vain pakosarjan materiaalin ulkopinnassa, eikä halkeamien havaittu jatkuvan pakosarjan virtauskanaviin.



Kuva 22. Vaurio pakosarjan kaulan puolivälillä



Kuva 23. Vaurio pakosarjan kaulan puolivälillä pakosarjan sisällä

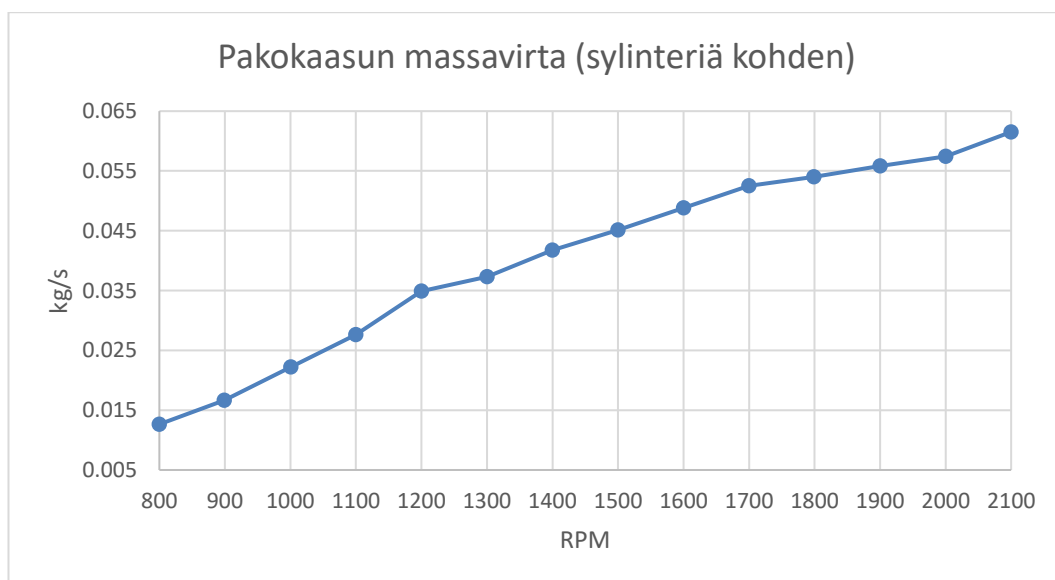
Kuvista 22 ja 23 nähdään suuremman vaurion syntyneen pakosarjan kaulan puolivälin tietämille. Vaurio on virtauskanavien suhteen kohtisuoraan syntynyt halkeama, joka jatkuu pinnalta pitkälle virtauskanavat erottavaan seinämään. Pakosarjan seinämä on näin ollen haljennut virtauskanaviin, mutta ei kuitenkaan potentiaalisesta riskistä huolimatta ole vuotanut pakokaasua ulospäin.

Edellä kuvattuja vaurioita aiheuttavia jännityksiä pyritään tämän työn puitteissa simuloimaan, jotta potentiaaliset riskikohdat havaittaisiin jatkossa jo pakosarjan suunnittelu vaiheessa. Näin pystyttäisiin välttämään laatuongelmilta ja kalliiden valumuottien uusimiselta.

5.2 Käytettävät lähtötiedot

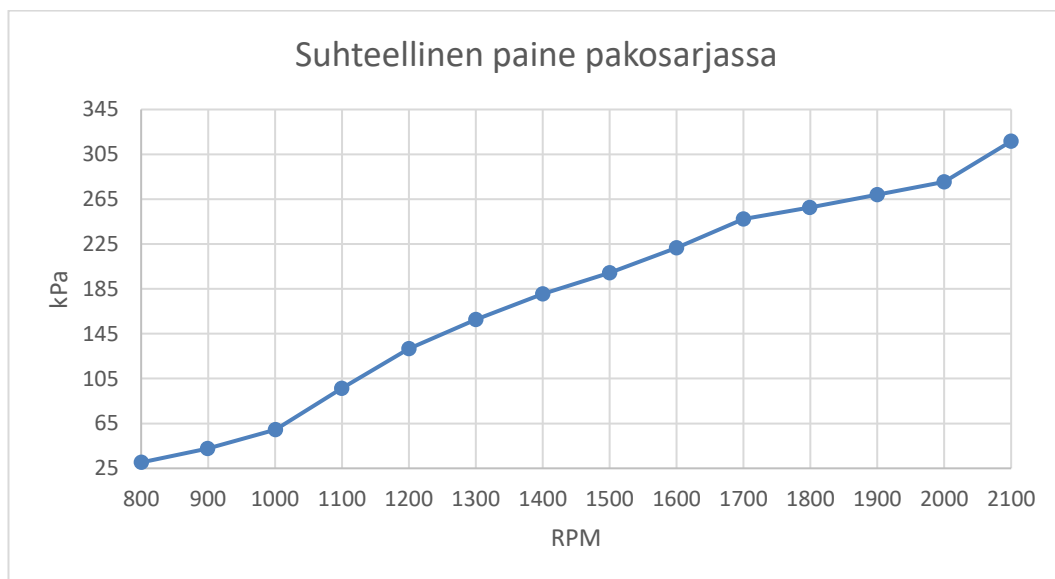
Tässä diplomityössä käytetään jo olemassa olevia AGCO Power Oy:n tarjoamia mittaustuloksia simuloinnin lähtötietoina. Mitattuja suureita on suhteellisen laajasti ja ne on kerätty moottorin kehitystarkoitukseen moottorin rasiustestistä. Kaikki mittaustulokset ovat esitetty suhteessa moottorin pyörimisnopeuteen ja tässä työssä esitellään vain työssä hyödynnetyt tiedot. Erillisiä mittauksia ei siis toteuteta tämän työn puitteissa, vaikka olemassa olevat mittaustulokset eivät olekaan suoranaisesti tätä simulointitapausta varten kerättyjä.

Pakokaasun massavirtaa ei ole erikseen mitattu, joten nämä arvot joudutaan soveltamaan. Mittaustuloksista löytyy kuitenkin moottoriin sisään menevän ilman keskimääräinen massavirta ja käytetyn polttoaineen keskimääräinen massavirta. Tekemällä oletus, että kaikki moottoriin sisään menevä massa tulee sieltä myös ulos, voidaan pakokaasun keskimääräiseksi massavirraksi arvioida sisään menevän ilman ja käytetyn polttoaineen massavirtojen summa. Saadut pakokaasun keskimääräiset massavirrat sylinteriä kohden suhteessa moottorin pyörimisnopeuteen on esitetty kuvassa 24. Näitä pakokaasun massavirran arvoja käytetään virtauslaskennan sisään virtauksen reunaehtona.



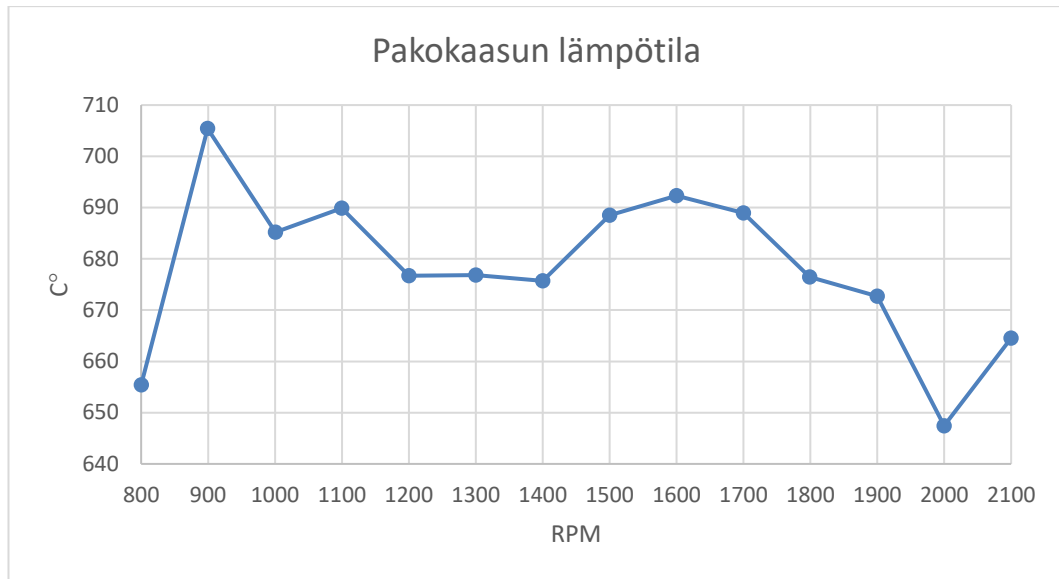
Kuva 24. Pakokaasun massavirta yhtä sylinteriä kohden moottorin pyörimisnopeuden suhteen

Pakosarjasta on mitattu pakokaasun paine molemmista pakosarjan virtauskanavista erikseen pakosarjan kaulalta, mutta ei pakosarjan turbon laipalta. Voidaan kuitenkin arvioida painetasen olevan samaa suuruusluokkaa myös pakosarjan ulostulossa ja näin käyttää simuloinneissa mitattuja paineen arvoja suoraan pakosarjan ulostulopaineena. Paineissa ei ole suurtakaan eroa pakosarjan kanavien välillä, joten tehdään yksinkertaistus ja käytetään samaa painetta molempien kanavien ulostuloreunaehtona. Mitatut pakokaasun suhteelliset paineet moottorin pyörimisnopeuteen suhteen on esitetty kuvassa 25.



Kuva 25. Pakosarjassa vallitseva paine moottorin pyörimisnopeuden suhteen

Pakokaasun lämpötila on myöskin mitattu pakosarjan molemmista virtauskanavista erikseen. Mittauspisteet ovat olleet virtauskanavan keskellä reunimmaisten sylinterien ensiöputkissa. Mitattujen lämpötilojen suuruuksissa ei ole huomattavaa eroa virtauskanavien välillä. Yksinkertaistuksena mitatuista lämpötiloista käytetään samaa lämpötilaa kaikille sylintereille ja lämpötilaa käytetään simuloinneissa suoraan sisään virtaavan pakokaasun lämpötilana. Mitatut pakokaasun lämpötilat suhteessa moottorin pyörimisnopeuteen on esitetty kuvassa 26.



Kuva 26. Pakokaasun lämpötila moottorin pyörimisnopeuden suhteen

Edellä esitettyjen arvojen lisäksi reunaehtoina käytetään erilaisia materiaalien ominaisuuksien taulukoituja arvoja. Nämä taulukkoarvot ovat kerätty erilaisista kirjallisuus- ja internetlähteistä tai käytetty ohjelmistojen valmiita materiaalikirjastoja.

6. SIMULOINTI

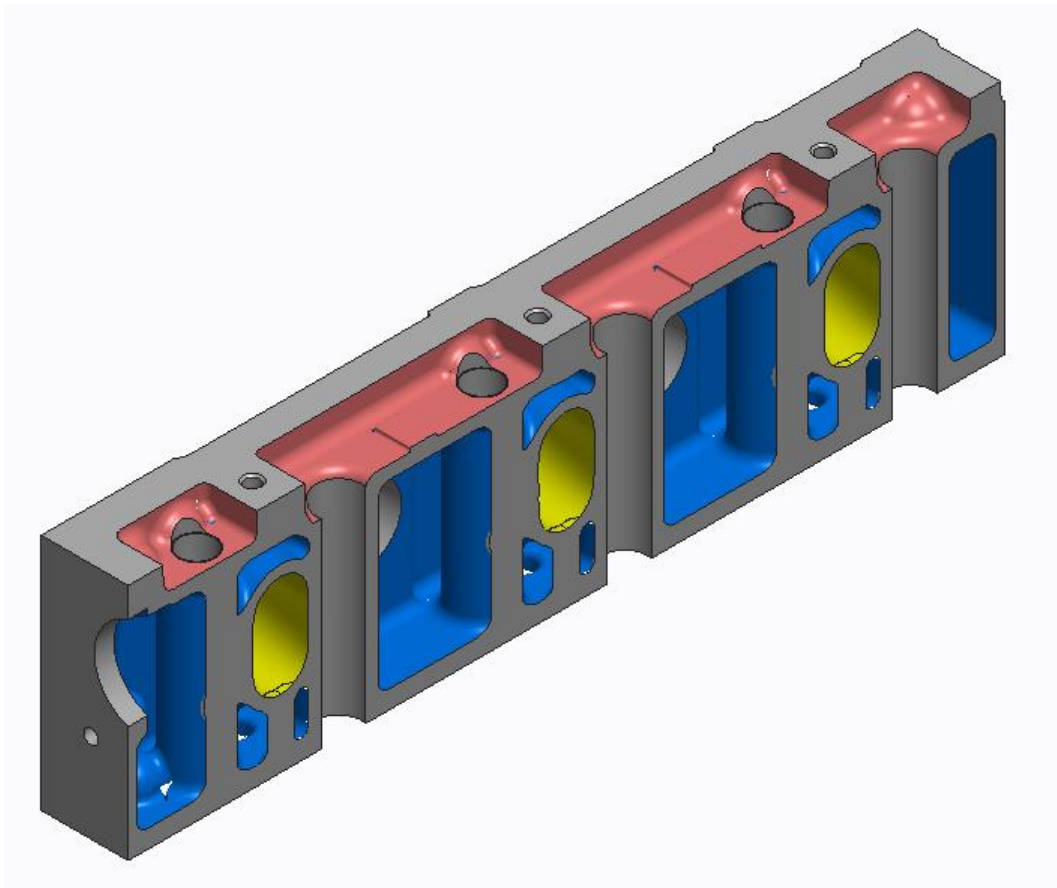
Tässä luvussa käydään läpi työn simulointi osuus kokonaisuudessaan. Simuloinnin tavoitteena on tutkia nopeakäyntisen dieselmoottorin valurautaisen pakosarjan lämpöjännityksiä. Simuloinnit suoritetaan ANSYS Fluent 19.1 ja ANSYS Mechanical 19.1 -ohjelmistoilla. ANSYS Fluent on numeeriseen virtausdynamiikkaan (CFD) tarkoitettu ohjelmisto, jolla analysoidaan kaasun ja nesteen virtauksia, sekä lämmönsiirtoa. ANSYS Mechanical laskee elementtimenetelmällä (FEM) rakenteiden kestävyyskykyä ja muodonmuutoksia. Tässä työssä ei esitellä näiden ohjelmien toimintaa tämän tarkemmin.

Ensimmäiseksi esitellään simuloinneissa käytetty geometria, sekä käytetyt laskentaverkot. Tämän jälkeen käydään läpi tässä työssä simuloitavat tilanteet ja niiden reunaehdot.

6.1 Geometria

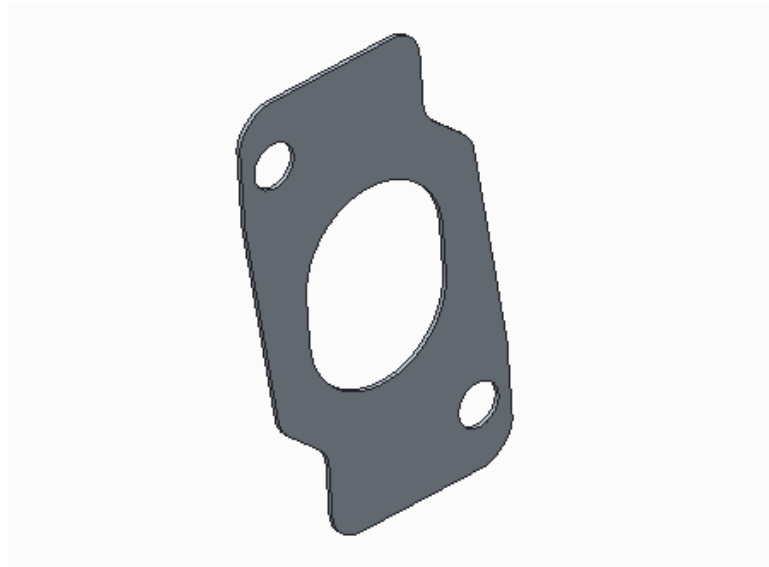
Simuloinnissa käytettävässä geometriassa on pakosarjan lisäksi pieni osa sylinterikansia, pakosarjan tiivisteet ja pakosarjan kiinnitys tarpeet. Geometria on valittu mahdollisimman todenmukaisen tilanteen simuloimiseksi, mutta kuitenkin laskentamallia liikaa kasvattamatta. Käytettävät 3D-mallit on pyritty pitämään suoraan Creo-malleina, joihin ei ole tehty yksinkertaistuksia simulointia varten. Tästä tekee poikkeuksen pakosarjan tiiviste, joka esitellään myöhemmin tässä luvussa.

Geometriassa moottorin sylinterikansi on kaksiosainen, koska AGCO Powerin yli 4-sylinterisissä moottoreissa käytetään kahta erillistä sylinterikantta. Sylinterikannet ovat 4-venttiilikansia, mistä johtuen pakoventtiilejä on 2 kappaletta sylinteriä kohden ja pakokanavat alkavat kaksiosaisina yhdistyen yhdeksi kanavaksi ennen pakosarjaa. Geometriassa käytettävien sylinterikansien viipaleet on rajattu pakokanavien yhdistymiskohdasta, jolloin malliin jää säännöllisen muotoinen ja yksiosainen pakokanava. Sylinterikannen pakokanavat toimivat simuloinneissa kaasun sisäänvirtausaukkoina. Tässä työssä käytettävän sylinterikannen geometria on esitetty kuvassa 27.



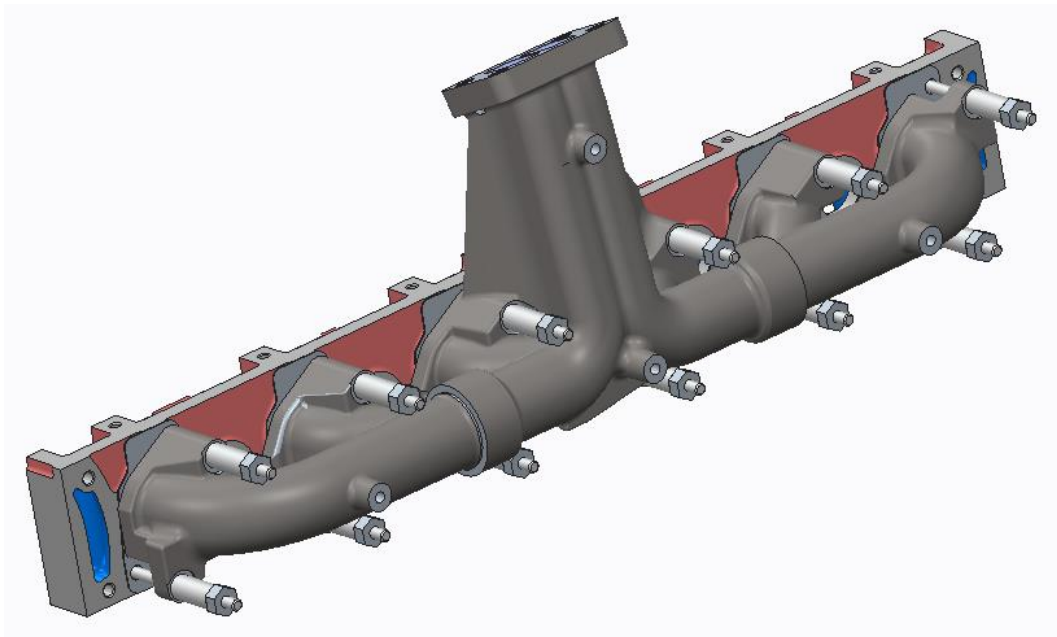
Kuva 27. Käytettävä sylinterikannen geometria

Sylinterikannen ja pakosarjan väliin tulee tiiviste. Pakosarjantiiviste koostuu käytännössä useasta hyvin ohuesta eri materiaalia olevasta kerroksesta. Tällaista rakennetta on kuitenkin hyvin raskasta simuloida suuren mallin sisällä, joten tässä työssä tiiviste onkin yksinkertaistettu ohueksi yksiosaiseksi levyksi. Käytetty tiivisteen malli on esitetty kuvassa 28.



Kuva 28. Käytettävä pakosarjan tiivisteiden geometria

Pakosarja kiinnittyy sylinterikanteen pitkällä vaarnaruuveilla, kaksi vaarnaa sylinteriä kohden. Vaarnat kiinnittyvät kierteillä sylinterikanteen ja pakosarja kiristetään muttereilla paikalleen. Kiinnitysmuttereiden ja pakosarjan väliin tulee holkit, jotka mahdollistavat pidempien vaarnojen käytön. Pakosarja kiinnitettynä sylinterikansiin ja samalla koko simuloinneissa käytettävä geometria on esitetty kuvassa 29.



Kuva 29. Pakosarja kiinnitettynä sylinterikansiin, koko käytettävä geometria

Käytettävässä geometriassa on kaikki tarpeelliset osat ja pakosarja on kiinnitettynä sylinterikansiin todellisen tilanteen mukaisesti. Tämän lisäksi lämmönsiirtyminen pakosarjasta sylinterikansiin ja kiinnitystarvikkeisiin voidaan huomioida.

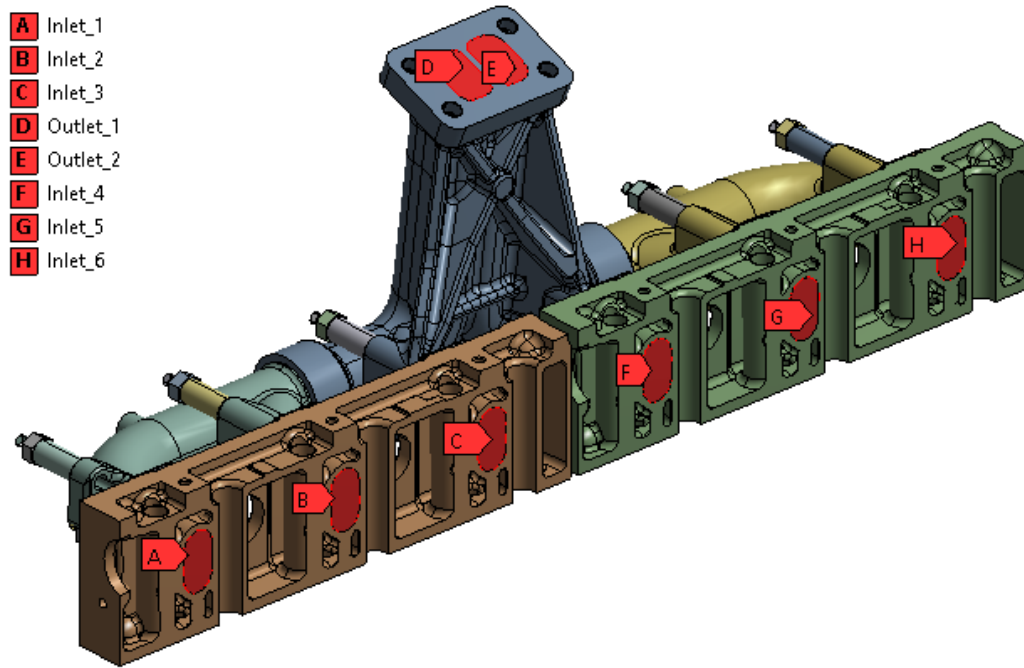
6.2 Laskentaverkot

Seuraavaksi tarkastellaan työssä käytettyjä laskentaverkkoja. Simuloinnissa käytetään erillisiä laskentaverkkoja pakosarjan lämpötilajakauman ja lämpötilajakauman aiheuttamien jännitysten ratkaisemiseksi. Laskentaverkot on pyritty pitämään mahdollisimman harvoina kevyen laskennan, mutta riittävän tiheinä mahdollisimman tarkkojen tulosten saamiseksi.

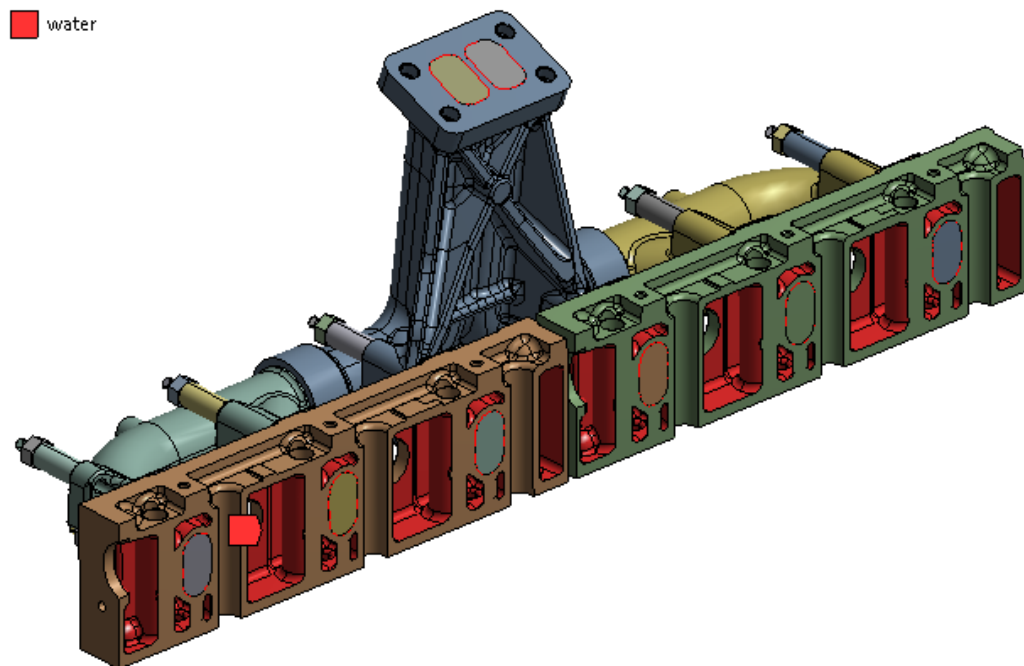
6.2.1 CFD-laskentaverkko

Laskentaverkko luodaan ANSYS Mesh -ohjelmistolla aikaisemmin esiteltyyn geometriaan. Ohjelman asetuksista valitaan verkon tyypiksi CFD ja ratkaisijaksi Fluent. Geometriasta verkotetaan samanaikaisesti, sekä kiinteät kappaleet, että virtaustilavuus. Näin pystytään helposti simuloimaan virtaavasta aineesta tapahtuva lämmönsiirtyminen kiinteään aineeseen ja saadaan tälle myös lämpötilajakauma.

Alkuun nimetään alueet, jotka toimivat kaasun sisään- (inlet) ja ulosvirtausalueina (outlet), näiden lisäksi nimetään sylinterikannen jäähdytysnesteeseen kanssa kosketuksissa olevat pinnat (water). Nimetyt alueet on esitetty kuvissa 30 ja 31. Sisään- ja ulosvirtausalueet rajaavat tilavuuden, jossa kaasun virtaus tapahtuu. Muut nimetyt pinnat helpottavat jatkossa reunaehtoien määrittämistä.



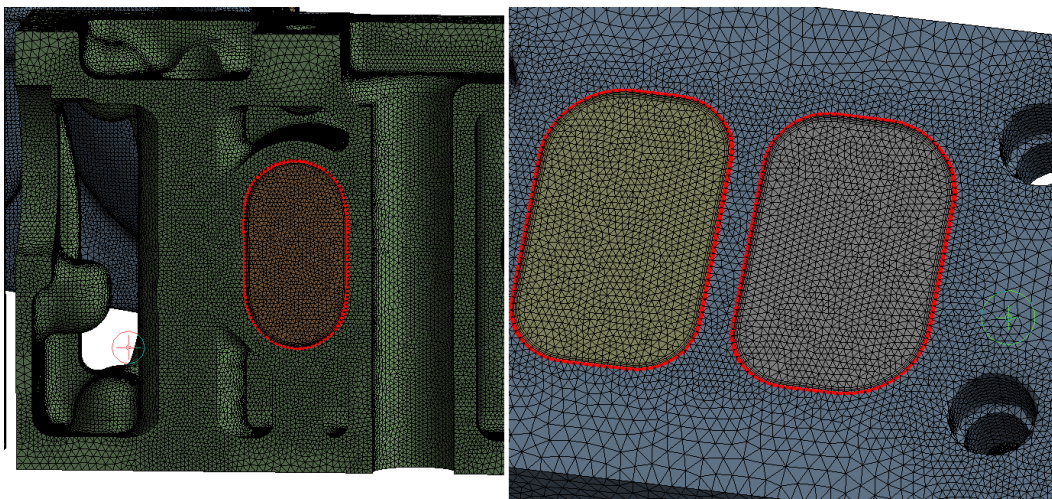
Kuva 30. Nimetyt sisään- ja ulosvirtausalueet



Kuva 31. Nimetty sylinterikansien vesitilan alue

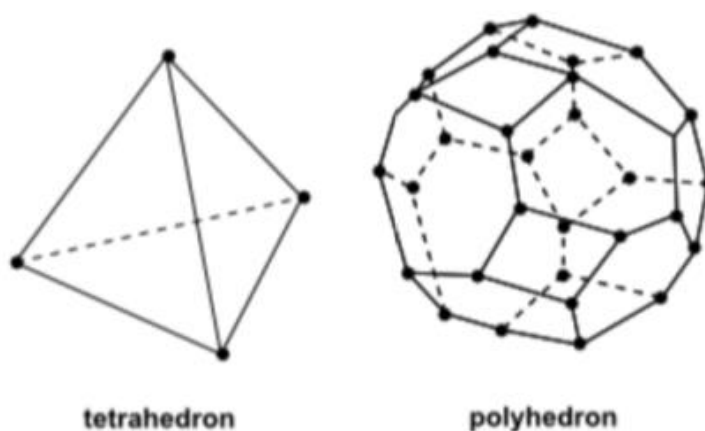
Verkotukseen käytetään tetraedri elementtejä, joiden suurin koko on rajattu 8 mm:iin ja pienin koko on rajattu 1 mm:iin. Tetraedri on monitahokas, jossa on neljä kolmion muotoista tahkoa. Näillä pystytään verkottamaan hyvin monimutkaisia geometrioita

tehokkaasti. Tämän lisäksi kaasuvirtausalueen seinämille on asetettu 5 elementin tihennys, jolla saadaan seinämävirtausten laskenta tarkemmaksi. Muodostettu laskentaverkko on havainnollistettu kuvassa 32, jossa näkyy myös seinämä tihennysten periaate.

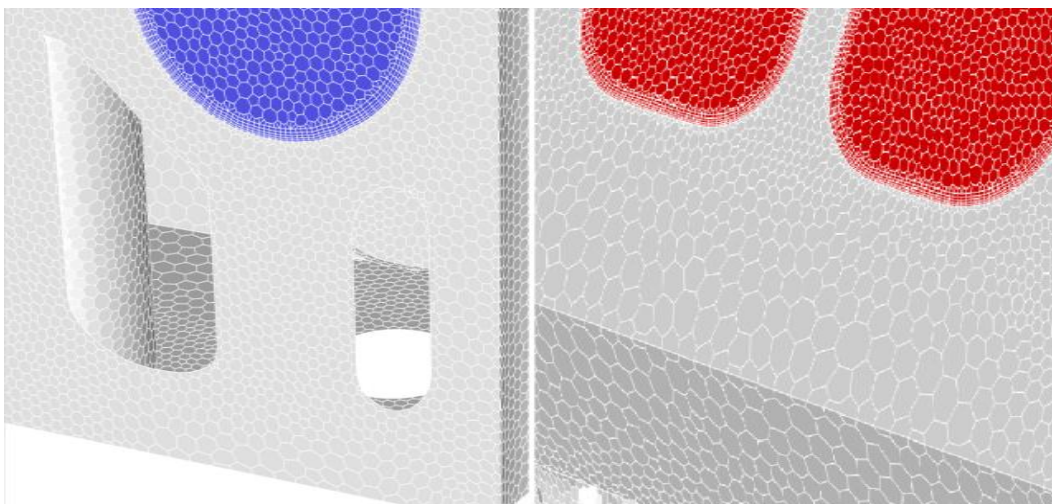


Kuva 32. Muodostettu tetraedri laskentaverkko

Laskentaverkko ladataan ANSYS Fluent -ohjelmistoon, jossa verkon tetraedri elementit muutetaan vielä polyedri elementeiksi eli kolmion muotoiset tahkot muutetaan monikulmioiksi. Polyedri ja tetraedrin erot on esitetty kuvassa 33. Lopullinen muodostettu laskentaverkko on esitetty kuvassa 34. Laskentaverkossa on 5 566 767 kappaletta laskenta-elementtejä.



Kuva 33. Tetraedrin ja polyedrin erot [14, s. 114]

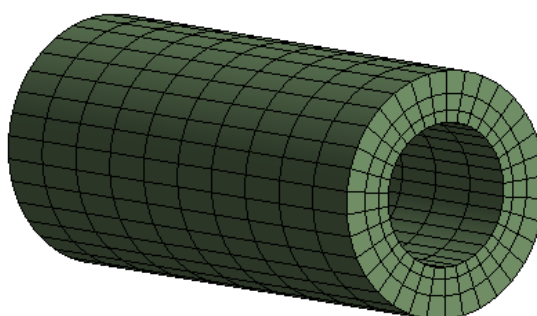


Kuva 34. Muodostettu polyedri laskentaverkko

6.2.2 FEM-laskentaverkko

FEM -laskentaverkko luodaan samantapaisesti kuin CFD-laskentaverkko, mutta ohjelman asetuksista valitaan verkon tyypiksi mekaaninen. Myöskään virtaustilavuutta ei tarvitse huomioida FEM-laskentaverkkoa muodostettaessa. Laskentaverkko muodostetaan aluksi ohjelman oletusasetuksilla, jonka jälkeen lisätään tihennyksiä ja muotoiluja haluttuihin paikkoihin.

Geometrian sylinterimäisiin osiin, holkkeihin ja vaarnaruuveihin, sekä muttereihin käytetään ohjelman sweep -toimintoa. Tällä toiminnolla saadaan laskentaverkko myötäilemään paremmin pyörähdyssymmetrisiä geometrioita. Kuvassa 35 on esitetty holkin laskentaverkko sweep -toiminnon jälkeen.

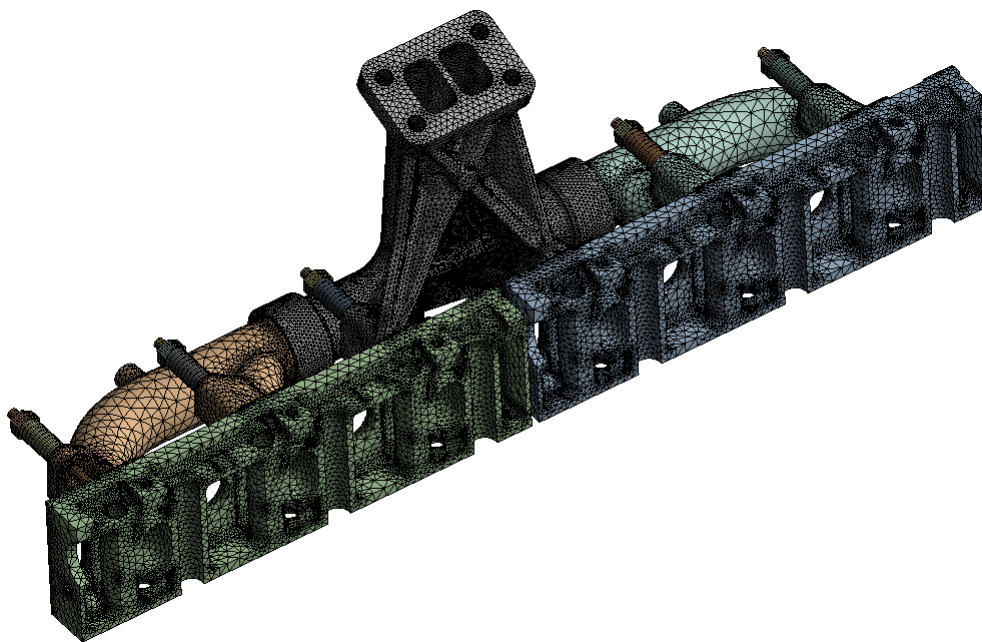


Kuva 35. Holkki, johon käytetty ANSYS Meshin sweep -toimintoa

Sylinterikansien ja tiivisteiden sekä pakosarjan ja tiivisteiden välisiin liitostasoihin lisättiin tihennykset, joissa elementin kooksi on määritetty 2 mm. Tihennykset on esitetty kuvassa 36. Myöskin pakosarjan keskimmäisen osan verkotusta on tihennetty ja elementtien kooksi on määritetty 5 mm ja pinnan, jossa vauriot ovat ilmenneet, verkotusta on tihennetty 2 mm:iin. FEM -laskentaverkko on esitetty kokonaisuudessaan kuvassa 37. Laskentaverkossa on 1 031 010 kappaletta laskentaelementtejä.



Kuva 36. Tiivistepintojen tihennetyt laskentaverkon alueet



Kuva 37. FEM laskentaverkko

6.3 Simuloitavat tilanteet

Simuloinnit aloitetaan pakokaasun virtauksen ja lämmönsiirron samanaikaisella mallintamisella ANSYS Fluentilla. Tuloksena saadaan lämpötilajakauma pakosarjalle. Lämpötilajakauma ratkaistaan useammalle tilanteelle, sekä aikariippumattomasti, että aikariippuvana. Saaduista lämpötilajakaumista ratkaistaan lämpöjännitykset ANSYS Mechanicalilla, joita vertaillaan eritilanteiden välillä. Läpi käytävät tilanteet ja tarkemmat reunaehdot käydään läpi tässä luvussa

6.3.1 CFD

Pakosarjan lämpötilajakauma simuloidaan, sekä aikariippumattomana, että aikariippuvaisena tilanteena ANSYS Fluentilla. Aikariippumaton simulointi kuvaa tilannetta, jossa moottoria on käytetty tasaisella pyörimisnopeudella ja tasaisella kuormituksella riittävän pitkä aika, jolloin pakosarjan lämpötilat ovat vakiintuneet. Tämä tilanne kuvaa siis pakosarjan kuuminta tilannetta pyörimisnopeuden ja kuormituksen suhteen. Aikariippuvaisella simuloinnilla kuvataan pakosarjan lämpenemis- ja jäähtymistilanteita.

Kaikissa simuloinneissa virtaavana kaasuna pidetään ilmaa, josta 78% on typpeä, joka ei osallistu palamisprosessiin ja näin ollen hallitsee myös pakokaasun koostumusta. Sisään virtaavalle kaasulle pidetään reunaehtoina massavirtaa ja lämpötilaa, jotka vaihtuvat simuloitavien tilanteiden mukaan. Massavirtaa pidetään kaikissa simuloinneissa tasaisena, jatkuvana ja samansuuruisena jokaiselle sylinterille. Tämä ei vastaa todellisuutta, koska

pakokaasun pulssimainen käytös jää huomioitta. Pakokaasupulssien simulointi vaatii kuitenkin erittäin pieniä aika-askelia ja näin ollen laskenta-aika venyisi mahdottomaksi tämän työn resurssien ja käytettävän ajan puitteissa. Kaasun ulosvirtaukselle on painereunaehdot, joka saadaan mittaustuloksista. Sylinterikannen jäähdytysnestetilaa on määritetty konvektiivinen lämmönsiirto virtaavan 90 °C veden ja valuraudan välille. Muiden osien ulkopinnalla on konvektiivinen lämmönsiirto ja säteily reunaehdot. Materiaalien ominaisuudet ovat ohjelmiston kirjastosta.

Aikariippumattomia tilanteita simuloidaan neljällä eri moottorin pyörimisnopeudella. Simuloitavat tilanteet on valikoitu pakokaasun lämpötilan mittaustuloksien, sekä moottorin teho- ja vääntöhuippujen perusteella. Kaksi simuloitavaa pistettä on valikoitu kuvassa 26 esiintyvän pakokaasun lämpötilan mukaan. Pisteiksi on valikoitu kaksi moottorin pyörimisnopeutta, joissa pakokaasun lämpötilat ovat korkeimmat. Näiden lisäksi valitaan moottorin tuottaman huipputehon ja -väännön pyörimisnopeudet. Simuloitavat pisteet on esitetty taulukossa 3, johon on kerätty myös virtauksen muut muuttuvat reunaehdot, jotka saadaan mittaustuloksista.

Taulukko 3. Aikariippumattomat simuloitavat tilanteet

Pyörimisnopeus	Massavirta	Pakokaasun lämp.	Ulostulon paine	Valintaperuste
900 rpm	0,0165 kg/s	705 °C	48,6 kPa	Pakok. lämp.
1400 rpm	0,0417 kg/s	675 °C	179,3 kPa	Huippu vääntö
1600 rpm	0,0488 kg/s	692 °C	216,8 kPa	Pakok. lämp.
2100 rpm	0,0615 kg/s	665 °C	316,6 kPa	Huippu teho

Aikariippuvainen simulointi suoritetaan vain huipputehon pyörimisnopeudella (2100 rpm). Simulointi aloitetaan tilanteesta, jossa geometria on 20 °C lämpötilassa ja sisään alkaa virtaamaan kuumaa ilmaa. Lämmitystilannetta jatketaan, kunnes lämpötilat ovat tasaantuneet. Tämän jälkeen sisään virtaava kuuman ilman massavirta asetetaan nol-laksi ja simulointia jatketaan. Tällä tavoin pyritään kuvaamaan pakosarjan jäähtymistä moottorin pysäytyksen jälkeen. Pakosarjan lämpötiloja seurataan jäähtymisen ajan.

6.3.2 FEM

Pakosarjan ja muun geometrian eri tilanteiden saadut lämpötilajakaumat tuodaan ANSYS Mechanicaliin yksitellen ja simuloidaan eri tilanteista syntyvät jännitykset. Jännitysten

simuloinneissa, lämpötilajakaumaa lukuun ottamatta, asetukset ja reunaehdot pysyvät samoina eri tilanteiden välillä.

Sylinterikansien liike on rajattu alareunalta ja leikkausreunalta samansuuntaisten tasojen suuntaiseksi. Kansien toisiaan kohti oleville reunoille on annettu hyvin pienet liikkumajarat, jotka ovat arvioitu sylinteriryhmän ja sylinterikansien lämpölaajenemisesta syntyvästä liikkeestä. Näin on pyritty saamaan sylinterikansille todellista tilannetta vastaava käyttäytyminen.

Vaarnaruuvit ovat määritetty kiinteiksi sylinterikansiin ja mutterit kiinteiksi vaarnoihin. Kierreliitosten ei oleteta joustavan, tässä työssä. Vaarnaruuveille on määritetty esikieristysvoima, moottorin kokoonpano-ohjeen mukaisesti. Pakosarjan osien välinen sylinterimäinen liitos saa liikkua vapaasti, mutta muut liitospinnat ovat määritetty kitkallisiksi liitoksiksi.

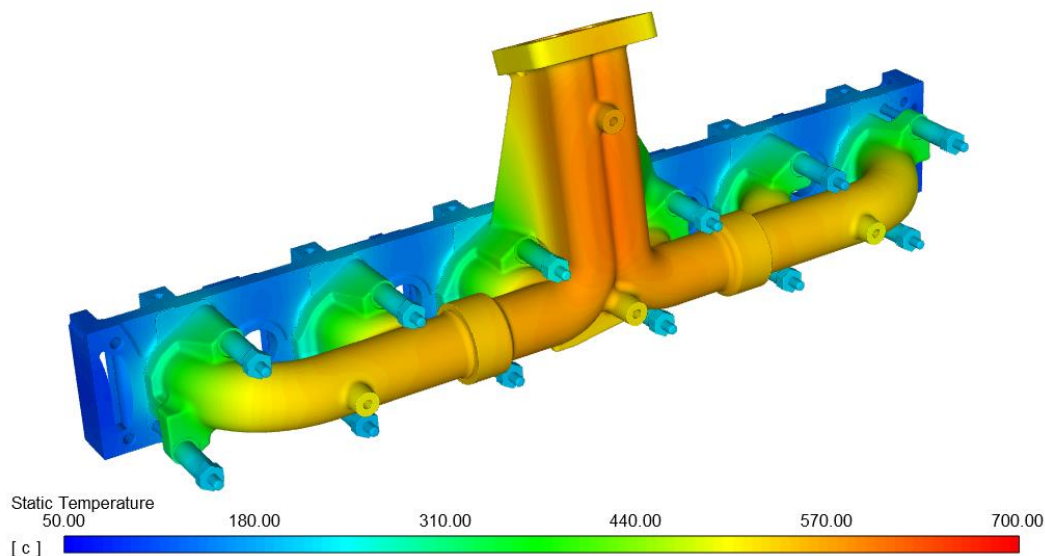
Jännitysten simulointi suoritetaan kahdessa vaiheessa. Ensimmäisessä vaiheessa ainoat systeemiin vaikuttavat voimat ovat pakosarjan kiinnityksen vaarnapulttien esikieristysvoimat. Tällä jäljitellään huoneen lämpöisenä kiinnitettyä pakosarjaa ja siitä aiheutuvia jännityksiä. Toisessa vaiheessa systeemiin tuodaan geometrian lämpötilajakauma, joka aiheuttaa, sekä osien lämpölaajenemisesta syntyvät, että sisäisistä lämpötilaeroista syntyvät jännitykset.

7. TULOKSET

Tässä luvussa tarkastellaan simuloinneista saatuja tuloksia. Aluksi käydään läpi, millaisia lämpötilajakaumia simuloinneista saadaan. Tarkastellaan lämpötilojen ja lämpötilaerojen kehitystä. Tämän jälkeen verrataan simuloinneista saatuja lämpötilajakaumia lämpökameralla saatuihin tuloksiin. Ennen loppupäätelmiä käydään läpi simuloinneista saadut jännitysjaakaumat.

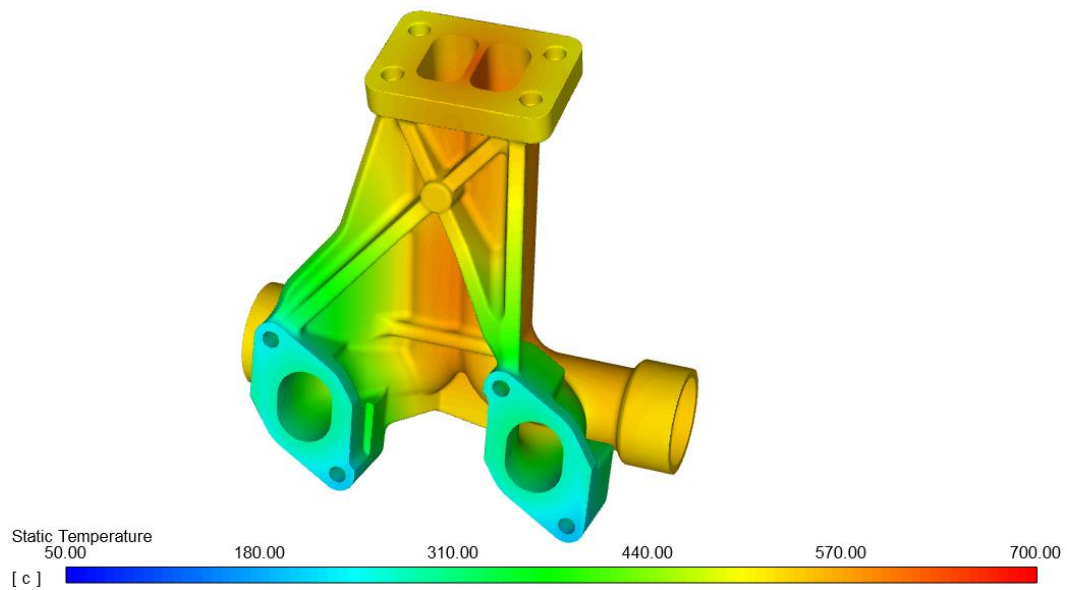
7.1 Lämpötilajakaumat

Simuloinnin tuloksena saatu lämpötilajakauma moottorin pyörimisnopeudella 2100 rpm ajasta riippumattomana tilanteena on esitetty kuvassa 38. Lämpötilaskaala kuvassa 38 on $50\text{ }^{\circ}\text{C} \rightarrow 700\text{ }^{\circ}\text{C}$, jossa sininen väri kuvaa matalaa ja punainen korkeaa lämpötilaa. Lämpötilajakaumasta nähdään selvästi sylinterikansien olevan huomattavasti pakosarjaa viileämmät, sekä pakosarjan kaulan olevan huomattavasti muuta pakosarjaa kuumempi.



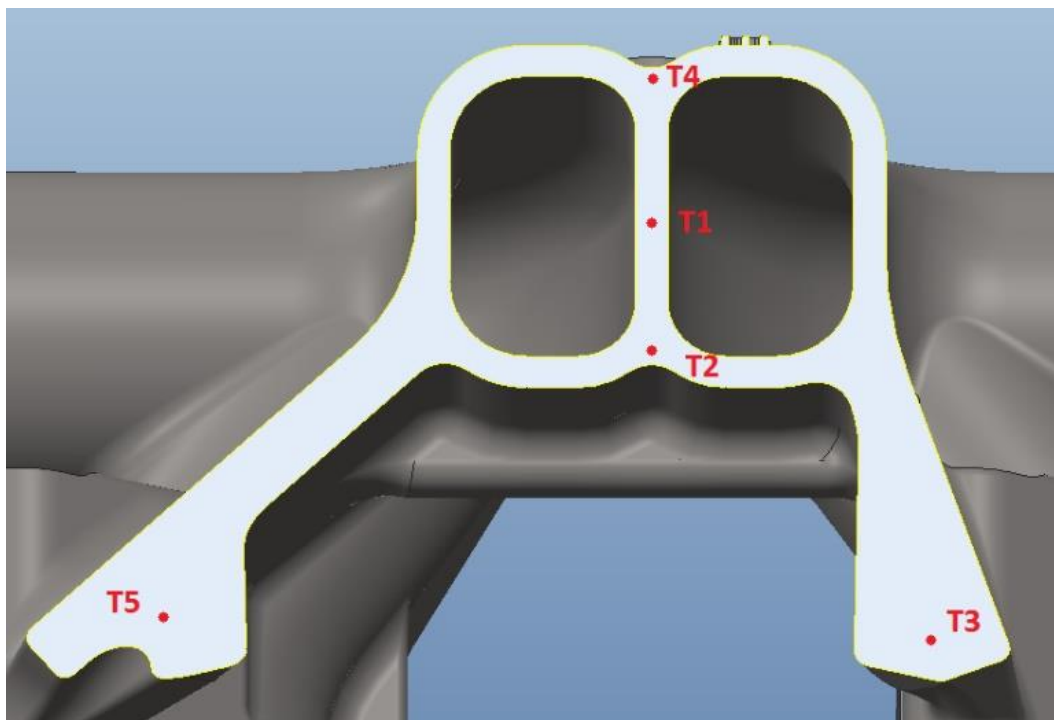
Kuva 38. Geometrian simuloitu lämpötilajakauma

Pakosarjan keskiosan tukiripojen lämpötilajakauma on esitetty kuvassa 39. Tästä kuvasta nähdään tukiripojen ja pakosarjan kiinnityslaippojen olevan huomattavasti muuta pakosarjaa viileämmät. Kuvasta 39 nähdään myös ahtimen laipalta pakokanavat erottavan seinämän olevan erittäin kuuma muihin osiin verrattuna.



Kuva 39. Pakosarjan keskiosan lämpötilajakauma, josta huomataan tukiripojen matalat lämpötilat

Lämpötilajakaumien lisäksi simuloinneista kerättiin pistemäisiä lämpötiloja pakosarjan kaulan poikkileikkauksesta kuvan 40 mukaisista pisteistä. Näillä haluttiin selvittää tarkemmin, kuinka lämpötilat käyttäytyvät eri simulointitilanteissa. Paikka valittiin pakosarjan kaulalle syntyneen vaurion kohdalta, koska ajateltiin tämän alueen lämpötilaerojen aiheuttavan jännityksiä materiaaliin.



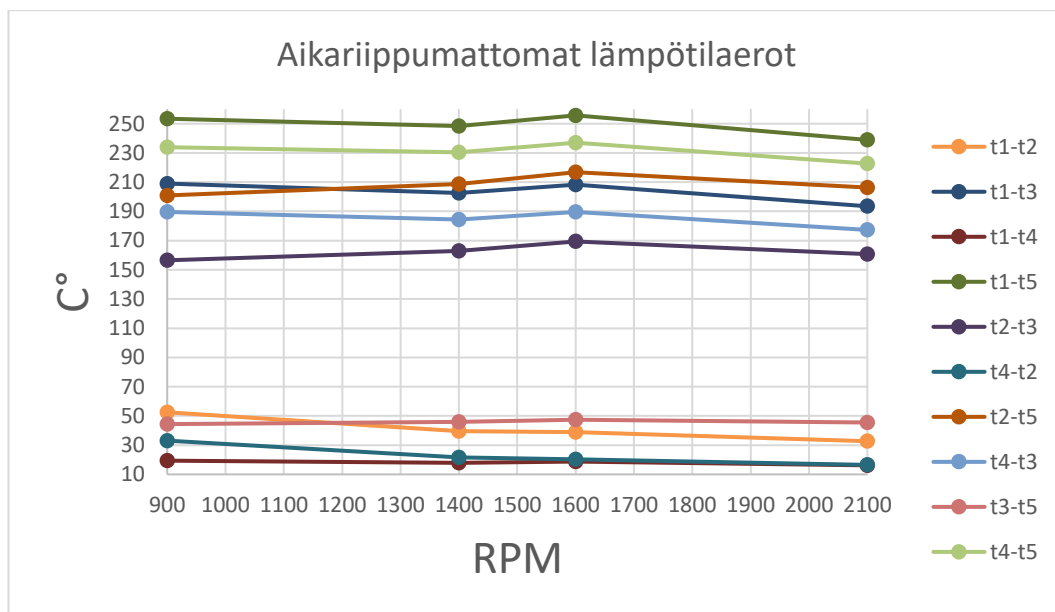
Kuva 40. Pakosarjan kaulan poikkileikkauksen lämpötilapisteet

Ajasta riippumattomien eri moottorin pyörimisnopeutta vastaavien simulointien lämpötilat kuvan 40 mukaisissa pisteissä on taulukoitu taulukkoon 4. Lämpötilojen huomataan poikkeavan samoissa pisteissä melko vähän toisistaan eri tilanteiden välillä.

Lämpöjännitysten johtuessa lämpötilaeroista, tarkastellaankin lämpötilapisteiden lämpötilaeroja. Nämä lämpötilaerot ovat esitetty kuvassa 41 moottorin pyörimisnopeuden suhteen. Lämpötilaerojen vaihtelevuus eri moottorin pyörimisnopeuksien välillä on olematonta, johon palataan jännitysten tarkastelussa myöhemmin.

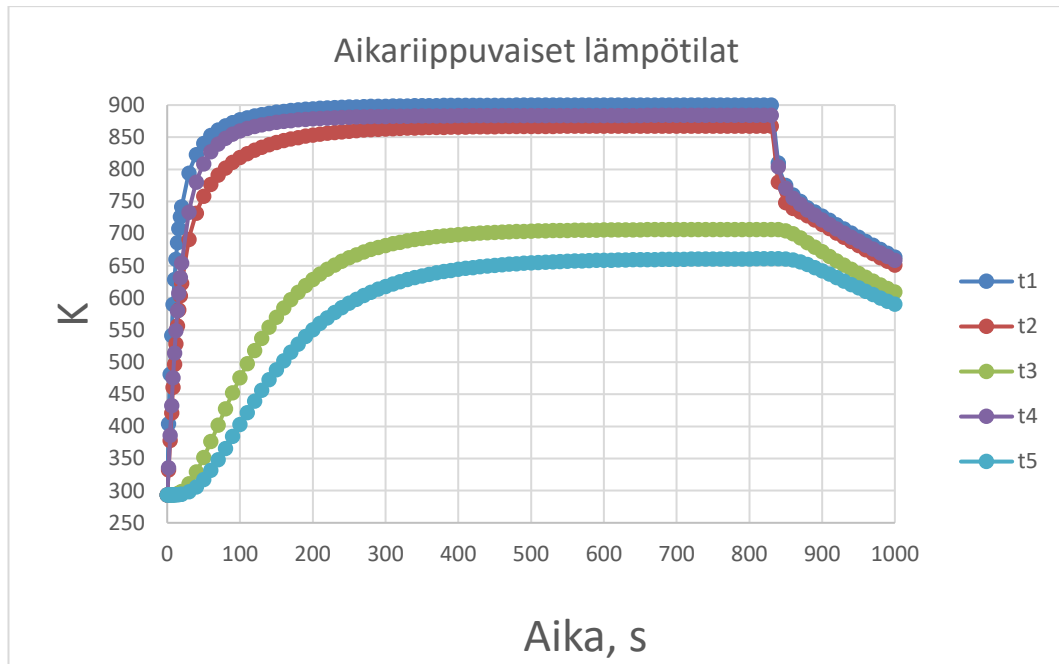
Taulukko 4. Ajasta riippumattomien simulointien pistemäiset lämpötilat

Pyörimisnopeus	900 rpm	1400 rpm	1600 rpm	2100 rpm
T1	584 C°	621 C°	643 C°	627 C°
T2	532 C°	581 C°	604 C°	594 C°
T3	375 C°	418 C°	434 C°	434 C°
T4	565 C°	603 C°	624 C°	611 C°
T5	331 C°	373 C°	387 C°	388 C°



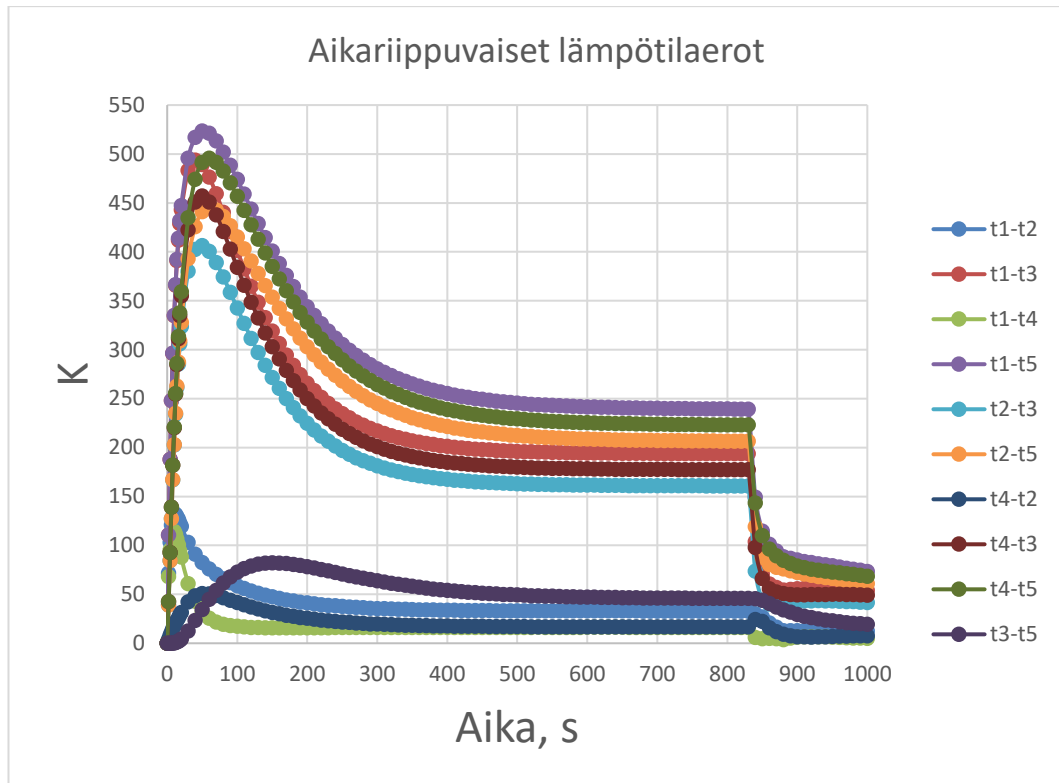
Kuva 41. Ajasta riippumattomien simulointien pistemäisten lämpötilojen lämpötilaeroja eri pisteiden välillä

Ajasta riippuvaisessa simuloinnissa kerätyt pistemäiset lämpötilat antavat hyvän kuvan siitä, miten lämpötilat kehittyvät ajan kuluessa pakosarjan poikkileikkauksessa. Lämpötilojen kehittyminen Kelvineissä on esitetty ajan suhteen kuvassa 42. Tästä nähdään kuinka pakosarjan sisäosat lämpenevät huomattavasti ulko-osia nopeammin ja kuinka lämpötilat saavuttavat maksiminsa vasta noin 800 sekunnin kohdalla, jossa lämpötilat vastaavat ajasta riippumattoman simuloinnin tuloksia. Noin 830 sekunnin kohdalla on aloitettu jäähdytysvaihe, josta nähdään lämpötilojen laskevan suhteellisen nopeasti.



Kuva 42. Pistemäisten lämpötilojen kehittyminen ajan suhteen

Pistemäisten lämpötilojen lämpötilaerot eri pisteiden välillä kehittyvät myös ajansuhteen. Lämpötilaerojen kehittyminen Kelvineissä ajan suhteen on esitetty kuvassa 43. Kuvasta nähdään lämpötilaerojen tasaantuvan noin 800 sekunnin kohdalla, jonka jälkeen jäähdytys tilanteessa erot lähtevät pienenemään. Mielenkiintoisia kohtia ovat kuitenkin simuloinnin alkuvaiheessa esiintyvät lämpötilaerojen huiput. Ensimmäiset huiput esiintyvät noin 10 sekunnin kohdalla, jossa poikkileikkauksen sisimmäisten pisteiden t1-t2 ja t1-t4 lämpötilaerot ovat suurimmillaan. Toiset, selkeästi suuremmat, huiput esiintyvät noin 60 sekunnin kohdalla, jossa sisimmäisten ja ulommaisten pisteiden lämpötilaerot ovat suurimmillaan. Nämä edellä esitetyt ajan hetket ovat valikoitu myös jännitysten simulointi pisteiksi suurten lämpötilaerojen takia.

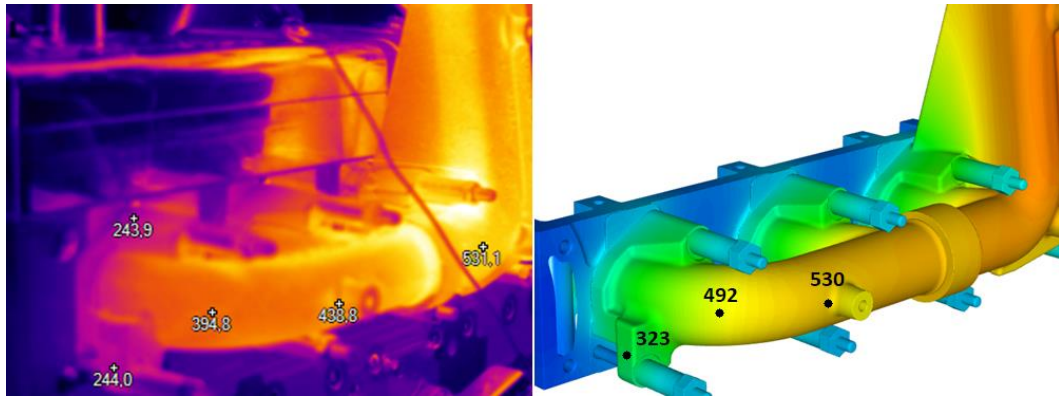


Kuva 43. Lämpötilaerojen kehittyminen ajansuhteen

7.2 Lämpökamera

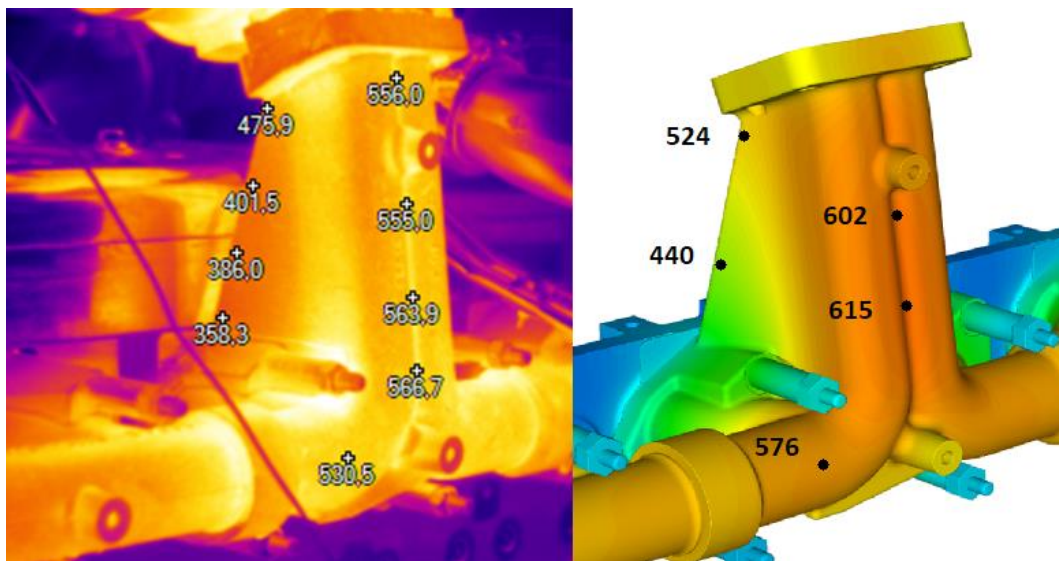
Lämpökamera mittaukset suoritettiin Fluke Ti3 lämpökameralla. Lämpökamera mittaa mittavan kohteen lähettämää lämpösäteilyä. Säteilyn määrä on hyvin riippuvainen materiaalista ja materiaalin pinnan laadusta, esimerkiksi kiiltävä pinta säteilee erittäin huonosti. Lämpökameran kuviin pitääkin määrittää materiaalin emissiokerroin, jona käytettiin samaa kerrointa kuin simuloinneissa.

Mittaukset suoritettiin moottorin rasiustestissä, jossa kuvattiin lämmennyttä pakosarjaa. Saatuja lämpökameran tuloksia on verrattu simuloinnissa saatuihin tuloksiin samalla moottorin pyörimisnopeudella. Vertailutulokset on esitetty kuvissa 44 ja 45. Kuvassa 44 on verrattu pakosarjan päätyosan lämpötiloja ja kuvassa 45 on verrattu pakosarjan keski-osan lämpötiloja lämpökamerakuvan ja simuloitujen tulosten välillä



Kuva 44. Pakosarjan päätyosan lämpökamerakuvan ja simuloitujen tulosten vertailu

Kuvasta 44 voidaan nähdä pakosarjan päätyosan lämpötiloissa noin $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ systemaattinen ero. Simulointi antaa selkeästi kuumempia lämpötiloja koko pakosarjan päätyosalle, mutta lämpötilan jakautuminen päätyosalle on hyvin samankaltaista lämpökameralla mitattujen tulosten kanssa. Tälle lämpötilojen systemaattiselle erolle voi olla monia syitä, joita käsitellään myöhemmin tässä työssä.

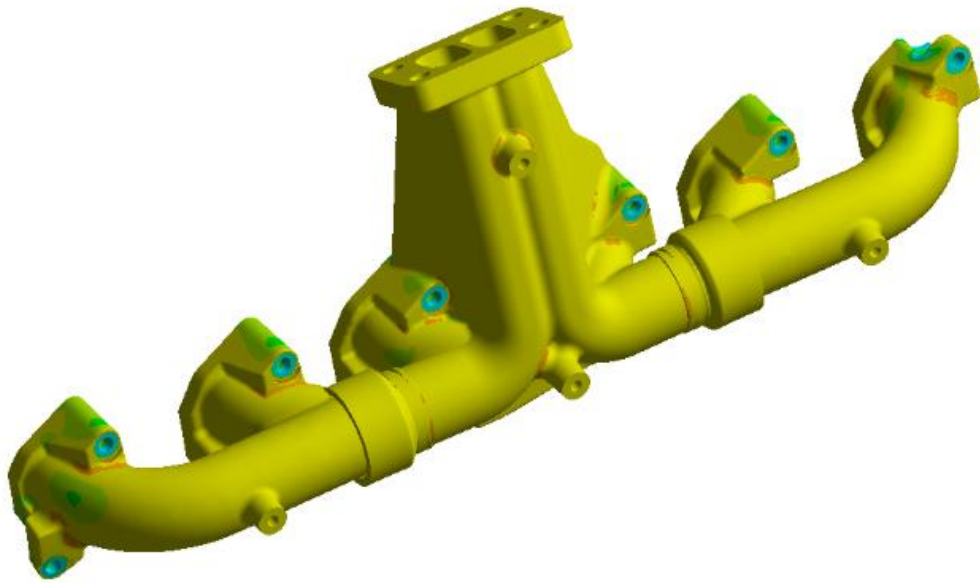


Kuva 45. Pakosarjan keskiosan lämpökamerakuvan ja simuloitujen tulosten vertailu

Vastaavasti kuvasta 45 havaitaan pakosarjan keskiosan simuloitujen tulosten ja lämpökamerakuvan välillä noin $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ systemaattinen ero. Kuitenkin myös tässä lämpötilojen jakautuminen vastaavat hyvin toisiaan tulosten välillä. Molemmista nähdään kuinka pakosarjan kaulan tukirakenteet ovat huomattavasti muuta osaa viileämmät.

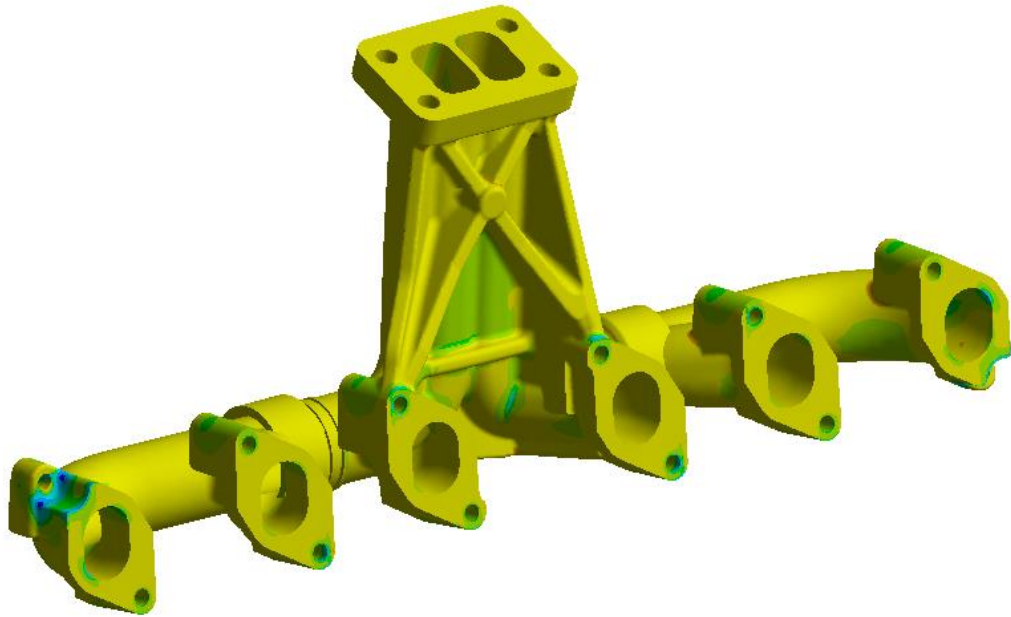
7.3 Jännitykset

Simuloinneista saaduista lämpöjännitys jakaumista nähdään kuinka jännitykset kohdistuvat pitkälti pakosarjan keskiosaan tukiripojen alueelle ja ensiöputkien sisämutkiin. Myös pakosarjan kiinnityslaipoille syntyy jännityksiä, mutta näihin ei tässä työssä keskitytä. Jännitysjakamat koko pakosarjalle on esitetty kuvissa 46 ja 47. Kuvissa keltainen väri on nolllataso, sininen ja vihreä kuvaavat puristavaa jännitystä ja punertavat sävyt kuvaavat vetävää jännitystä.



Kuva 46. Pakosarjan jännitysjakauma moottorin ulkopuolelta

Tuloksista nähdään simuloinneissa syntyneiden jännitysten olevan pääasiassa puristavia. Vaikka tuloksissa esiintyy puristusjännityksiä, saattaa jäähtyneessä tilanteessa tulla vetojännityksiä, mikäli plastisoitumista tapahtuu puristusjännitysten aikana.



Kuva 47. pakosarjan jännitys jakauma moottorin puolelta

Jännitysten arvoja tarkasteltiin tarkemmin vain pakosarjan keskiosasta. Eri simulointitilanteista jännitysten arvot kerättiin pakosarjan kaulalta ja ensiöputkien sisämutkista, joihin jännitysten esiintymät keskittyivät.

Ajasta riippumattomien tilanteiden lämpötilajakaumiin pohjautuneiden simulointien jännitykset on kerätty taulukkoon 5, jossa tulokset on esitetty moottorin pyörimisnopeuden mukaan. Taulukossa vasen ja oikea viittaavat ensiöputkien sisämutkiin katsottuna pakosarjaa moottorin puolelta. Taulukossa esitetyt jännitysten arvot ovat puristusta.

Taulukko 5. Ajasta riippumattomista lämpötilajakaumista simuloitujen jännitykset

Pyörimisnopeus	Kaula	Vasen	Oikea
900 rpm	97 MPa	120 MPa	132 MPa
1400 rpm	98 MPa	127 MPa	135 MPa
1600 rpm	101 MPa	132 MPa	141 MPa
2100 rpm	96 MPa	131 MPa	138 MPa

Taulukon 5 arvoista nähdään, etteivät jännitysten arvot juurikaan muutu eri tilanteiden välillä. Tähän antoi viitteitä myöskin simuloitujen lämpötilojen samankaltaisuus moottorin pyörimisnopeuksien välillä.

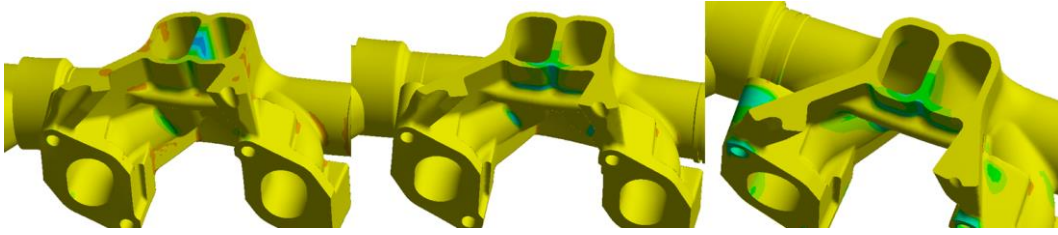
Ajasta riippuvan tilanteen lämpötilajakaumilla simuloitujen jännitysten tulokset ovat esitetty taulukossa 6. Tulokset on esitetty simuloitavan pisteen ajanhetken mukaan pakosarjan lämpenemisen alusta. Taulukossa vasen ja oikea viittaavat ensiöputkien sisämutkiin katsottuna pakosarjaa moottorin puolelta. Taulukossa esitetyt jännitysten arvot ovat puristusta.

Taulukko 6. Ajasta riippuvista lämpötilajakaumista simuloitujen jännitykset

Aika	Kaula	Vasen	Oikea
10 s.	245 MPa	210 MPa	205 MPa
60 s.	228 MPa	240 MPa	240 MPa
800 s.	96 MPa	130 MPa	138 MPa

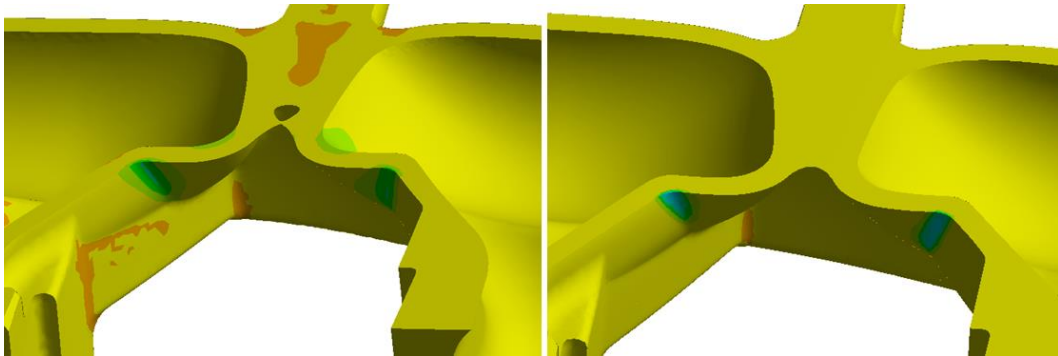
Taulukon arvoista voidaan huomata 800 sekunnin ajanhetkellä jännitysten vastaavan hyvin aikariippumattoman simuloinnin tulosta, molemmat kuvaavat hetkeä, jossa pakosarjan lämpötilat ovat saavuttaneet suurimmat arvonsa. Tuloksista huomataan myös jännitysten olevan huomattavasti korkeammat pakosarjan lämpenemisvaiheessa kuin täysin kuumassa tilanteessa. Tämän voidaan olettaa johtuvan pakosarjan sisäosien huomattavasti nopeammasta lämpenemisestä ulko-osiin verrattuna, aiheuttaen korkeita lämpötilaeroja. Ajan kanssa kuitenkin lämpötilaerot sisä- ja ulko-osien välillä pienenevät.

Kuvassa 48 on esitetty pakosarjan kaulalla esiintyvä jännityskeskittymä 10 s, 60 s ja 800 s. ajanhetkiltä. Kuvista nähdään jännityksen esiintyvän 10 s. ajanhetkellä virtauskanavat jakavan seinämän keskellä, kun taas myöhemmillä ajanhetkillä jännitysesiintymä on siirtynyt selkeästi kohti ulkoreunaa.



Kuva 48. Jännityskeskittymä pakosarjan kaulalla 10 s., 60 s. ja 800 s. ajanhetkillä.

Pakosarjan ensiöputkien sisämutkien jännitysesiintymät on esitetty kuvassa 49 ajanhetkillä 10 s. ja 60 s. Kuvasta nähdään, etteivät jännitysesiintymien sijainnit muutu eri tilanteissa, ainoastaan jännitysten suuruus. Nähdään myös jännitysten esiintyvän vain materiaalin pinnalla.



Kuva 49. Jännitysesiintymät pakosarjan ensiöputkien sisämutkissa ajanhetkillä 10 s. ja 60 s.

Kuvasta 47 voidaan havaita jännitysesiintymä ensimmäisessä kiinnityslaipassa. Tässä työssä ei kuitenkaan paneuduta tähän, mutta voidaan todeta kiinnityslaipan olevan selkeä riskipaikka simuloinnin perusteella ja vaativan tarkempaa tarkastelua.

7.4 Päätelmät

Simuloinnilla saadaan pakosarjalle vähintään oikean suuntainen lämpötilajakauma, kun tuloksia verrataan lämpökamerakuvaan. Systemaattista virhettä löytyy lämpötilojen arvoista, mutta se voi johtua, sekä simuloinnista, että lämpökamerasta.

Jännitysten esiintymät tuloksissa voidaan helposti todeta olevan oikeilla jäljillä, kun verrataan kuvista 21 ja 49 pakosarjan ensiöputkien sisämutkien vaurioita ja simuloituja tuloksia, sekä kuvista 22 ja 48 pakosarjan kaulan vaurioita ja simuloituja tuloksia.

Pakosarjan ensiöputkien vauriota ei pystytty toteamaan menneen materiaalin läpi. Tämän suuntaisia päätelmiä voidaan tehdä myös simuloituista tuloksista, joissa jännitykset jäävät selvästi materiaalin pintaan. Pakosarjan kaulalle syntynyt vaurio on huomattavasti suurempi ja jatkuu selkeästi syvälle materiaaliin. Simuloinnin tuloksena jännitysesiintymä on saman muotoinen vaurion kanssa. Jännitysesiintymä on kuitenkin melko laaja korkeussuunnassa, joten vaurion tarkkaa paikkaa ei tämän simuloinnin perusteella voitaisi ennustaa.

Tuloksista voidaan myös todeta pakosarjan kokevan kovimmat rasitukset lämmitessään ja nimenomaan suurien lämpötilaerojen nostavan jännitystasoja. Pakosarjan raskaasti muotoiltu keskiosa on selkeästi altis lämpöjännityksille.

8. VIRHELÄHTEET JA NIIDEN KARSINTA

Simuloinnin tulokset ovat juuri niin hyviä kuin simulointiin käytetyt lähtötiedot. Tässä luvussa käydään läpi työssä mahdollisesti esiintyviä virhelähteitä ja pohditaan tulevaisuuden toimia, joilla näitä pystytään karsimaan. Virhelähteet ja tulevaisuuden toimet tarkastellaan aihealueittain.

8.1 Lähtöarvot

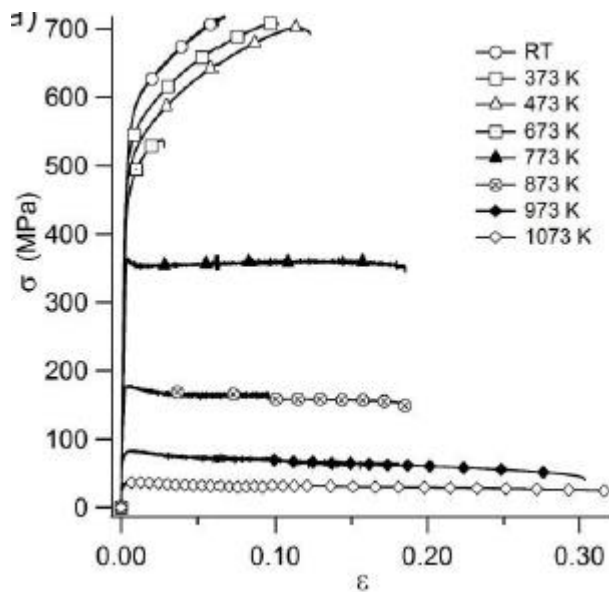
Tässä työssä käytetyt mittaustulokset oli mitattu jo ennen tämän työn suunnittelua. Tämä aiheutti sen, että osassa simuloinnin lähtöarvoista jouduttiin tekemään oletuksia. Mittauspisteitä ei ollut esimerkiksi aivan samoissa paikoissa, joihin lähtöarvoja simuloinneissa käytettiin. Tämä vaikuttaa varmasti tulosten tarkkuuteen jossain määrin. Suoritettavat mittaukset olisivatkin hyvä suunnitella myös simuloitavien tilanteiden kannalta ja pohtia millaisia tarpeita kaikilla mittaustuloksia käyttävillä osapuolilla on. Esimerkiksi pakokaasun lämpötilaa tulisi mitata useammasta pisteestä, jotta simuloinnissa voitaisiin varmistua lämmönsiirron reunaehtojen toimivuudesta.

Mittaustuloksia käytettiin lähinnä virtaavan pakokaasun reunaehtoina. Virtaus on hyvin herkkä ja muuttuu merkittävästi jo pienistä muutoksista, joka johtuu turbulenssin hyvin pienistä aikaskaaloista. Lämmönsiirtyminen ei ole aivan yhtä herkkä pienille muutoksille, johon tässä työssä kuitenkin keskityttiin. Tämä vaatisikin tarkemman herkkyystarkastelun lähtöarvojen suhteen, kuinka virtaavalle pakokaasulle annetut lähtöarvot vaikuttavat pakosarjan lämpötilajakaumaan. Tällä saataisiin selville, esimerkiksi tarvitseeko systeemiin virtaavan pakokaasun lämpötila tietää 100, 10 tai 1 asteen tarkkuudella ja kuinka suuri virheen suuruus voi olla.

8.2 Materiaalit

Simuloinneissa käytettiin materiaaleina ohjelmistojen kirjastoista löytyviä vaihtoehtoja. Näistä ei kuitenkaan löytynyt täysin vastaavia todellisuudessa käytettäviä materiaali vaihtoehtoja. Materiaaliomaisuudet ovat kuitenkin hyvin tärkeässä roolissa lämmönjohtumisessa ja jännitysten muodostumisessa. Tässä työssä esitetty simulointimalli vaatisikin perusteellisen materiaalimallien tutkimisen ja mallien luomisen ohjelmistoihin.

Materiaaliominaisuuksille pitäisi ehdottomasti määrittää oikeanlaiset lämpötilariippuvuudet, koska työssä esiintyvissä korkeissa yli $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ lämpötiloissa materiaalit käyttäytyvät hyvin eri tavalla kuin huoneenlämmössä. Tästä on esimerkkinä kuvassa 50 esitetty pallografiittivaluraudan jännitys-venymäkäyrä eri lämpötiloissa, josta nähdään lujuuden voimakas laskeminen lämpötilan noustessa.



Kuva 50. Pallografiittivaluraudan jännitys-venymäkäyrä eri lämpötiloissa [15]

8.3 Tilanteiden kuvaus

Tässä työssä pakokaasun virtaus kuvattiin yksinkertaisesti samanaikaisena tasaisena massavirtana kaikille sylintereille. Tämä ei kuitenkaan vastaa tarkasti moottorin todellista syklistä toimintaa. Yksinkertaistaminen saattaa vaikuttaa paljonkin pakosarjan lämpötilojen kehittymiseen. Pakokaasujen todelliset pulssit tulisikin mallintaa, jotta pystyttäisiin kokeilemaan ja vertaamaan näiden vaikutus työssä käytettyyn tapaan nähden. Vertailun pohjalta pystyttäisiin paremmin arvioimaan olisiko pakokaasupulssien työläämmästä mallintamisesta ja raskaammasta laskennasta todellista hyötyä. Vertailun avulla saatettaisiin myös pystyä arvioimaan jatkossa yksinkertaistetun mallin aiheuttamaa virhettä tällaista käytettäessä.

Käytetyssä geometriassa ei huomioitu mitenkään sylinterikannen venttiilejä ja niiden vaikutusta kaasun virtaukseen. Varsinkin pakokaasupulssien mallintamisessa tulisi miettiä myös venttiilien toiminta ja vaikutus. Myöskään pakosarjan jälkeen tapahtuvaan kaasun virtaukseen ei työssä käytetyssä geometriassa tai reunaehdoissa otettu kantaa. Tämä tulisi kuitenkin luultavasti jollain tapaa ottaa huomioon, koska virtausgeometria pakosarjan jälkeen saattaa vaikuttaa merkittävästi virtaukseen pakosarjan loppuosassa.

8.4 Tulosten paikkansapitävyys

Simuloinnin tuloksena saadaan hienoja värikuvia, joiden tulkitseminen ja absoluuttisen oikeellisuuden arviointi ovat haastavaa. Tulokset tulisi todentaa erilaisilla käytännön

testeillä, varsinkin uuden simulointimallin käyttöönoton yhteydessä. Simulointeja tulisi suorittaa useammalla erilaisella geometrialla ja todentaa saatujen tulosten paikkansa pitävyys, jotta voitaisiin varmistua simulointimallin toimivuudesta. Voidaan kuitenkin todeta työssä esitetyllä simulointimallilla saatavan hyvä käsitys mahdollisista riskipaikoista.

Tässä työssä käytettiin simuloidun lämpötilajakauman todentamiseen lämpökameran kuvaa. Lämpökameralla saadaan helposti kuvattua koko kohteen lämpötilajakauma. Lämpökamera kuitenkin vaatisi myös itsessään saadun tuloksen oikeellisuuden todentamisen, koska kamerassa pitää erikseen määrittää materiaalien emissiivisyys. Materiaalien säteilyyn vaikuttaa niin materiaalin tyyppi kuin pinnanlaatu, myös lämpötilalla on vaikutusta, joten suora taulukkoarvo tietyn materiaalin emissiivisyydelle saattaa olla hyvinkin väärä. Säteilyn heijastuminen tarkasteltavan pinnan ulkopuolelta saattaa myös helposti aiheuttaa virhettä lämpökameran kuvaan.

Tässä työssä esiintyneen systemaattisen virheen simuloidun tuloksen ja lämpökamerakuvan välillä saattaa osittain selittää lämpökamerassa käytetyn emissiivisyyden virheellisyys. Kuvissa esiintyi pakosarjan kahden osan välillä erisuuruinen systemaattinen virhe, joka voi selittyä kappaleiden erilaisilla pinnanlaaduilla tai sekä hieman muuttuneesta kuvauskulmasta. Yksinkertaistukset simulointimallissa saattavat myös vaikuttaa erilailla tuloksiin pakosarjan eriosissa. Lämpökameran tuloksen tarkkuutta voisi parantaa mittaamalla lämpötila materiaalin pinnalta kuvaus hetkellä muutamasta pisteestä kosketusanturilla ja säätämällä kameran näyttämä näiden erikseen mitattujen arvojen pohjalta.

Pakosarjan simuloitujen jännitysten todentaminen yli $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ lämpötilassa saattaa olla hyvin hankalaa. Tässä työssä käytettiin jännitysten vertailuun vaurioitunutta pakosarjaa ja tällä nähtiinkin simuloitujen jännitysten esiintyvän syntyneiden vaurioiden alueilla, mutta simuloitujen jännitysten suuruutta ei tietenkään voida todentaa tällä tavoin. Vaurioitunutta kappaletta ei myöskään ole saatavilla, kun suunnitellaan täysin uutta geometriaa.

9. YHTEENVETO

Tämän diplomityön tavoite oli tutkia simuloimalla nopeakäyntisen dieselmoottorin valurautaiseen pakosarjaan syntyviä lämpöjännityksiä. Työn alussa tutustuttiin mäntämoottorin toimintaperiaatteeseen ja pakosarjan olemukseen. Teoriaosuudessa esiteltiin pakosarjaan vaikuttavien ilmiöiden perusteoriaa, kuten kaasun virtausta hallitsevat yhtälöt, lämmönsiirron eri muodot ja lämpöjännitysten periaate. Tämän jälkeen perehdyttiin aiemmin julkaistuihin artikkeleihin pakosarjan lämpöjännitysten simuloinnista. Lopuksi suoritettiin omat simuloinnit, tarkasteltiin saatuja tuloksia ja mahdollisia virhelähteitä.

Työssä tutkittiin olemassa olevaa pakosarjan geometriaa, jossa oli havaittu vaurioita moottorin rasiustestien jäljiltä. Nämä vauriokohdat pyrittiin löytämään myös simuloimalla, jotta tulevaisuudessa pystyttäisiin jo suunnitteluvaiheessa löytämään mahdolliset riskikohdat. Moottorin rasiustestistä oli kerätty mittaustuloksia tuotekehityksen tarpeisiin, mutta ei juuri tähän simulointi tapaukseen. Mittaustuloksista pystyttiin kuitenkin soveltamaan simulointeihin lähtötietoja pakokaasulle.

Simuloinneissa suoritettiin kaasulle virtausanalyysi pakosarjassa ja mallinnettiin samanaikaisesti lämmön siirtyminen kaasusta kiinteään materiaaliin. Tällä tavalla saatiin melko yksinkertaisesti pakosarjalle lämpötilajakauma, jota käytettiin edelleen reunaehtona jännitysten simuloinneissa. Jotta laskenta-ajat saatiin pidettyä kohtuullisina, simuloinnit suoritettiin hyvin yksinkertaisilla malleilla, sekä aikariippumattomasti, että aikariippuvana.

Lämpötilojen kehittymistä seurattiin tarkemmin pakosarjan kaulalla ilmenneen vaurion kohdilta. Aikariippuvassa tarkastelussa havaittiin kuinka suurimmat lämpötilaerot esiintyvät pakosarjassa sen lämpenemisen yhteydessä. Suurimpien lämpötilaerojen esiintymishetkeltä ratkaistiin myös pakosarjaan syntyvät lämpöjännitykset. Pakosarjalle simuloitua lämpötilajakaumaa verrattiin lämpökamera kuvaan, jossa havaittiin kolmiosaisen pakosarjan päätyosalla $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ja keskiosalla $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ systemaattinen virhe. Simulointi antoi huomattavasti kuumempia tuloksia.

Jännitykset simulointiin, sekä pakosarjan kuumimmilta lämpötiloilta, että pakosarjan lämpenemisen vaiheilta. Tuloksista huomattiin suurimpien jännitysten esiintyvän nimenomaan pakosarjan lämmitessä ja laskevan jopa huomattavasti täysin kehittyneessä lämpötilassa. Simuloidut jännitykset osoittautuivat tulosten tarkastelussa pääasiassa puristaviksi jännityksiksi. Jännitykset esiintyivät täysin moottorin rasiustestissä aikaansaatuja vaurioita vastaavilla paikoilla, josta voidaankin todeta simuloinnilla pystyvän ennakoimaan tulevaisuudessa mahdollisia riskipaikkoja.

Työssä jäi monelle osa-alueelle aihetta jatko tutkimukselle, kuten pakosarjan materiaalia vastaavien ohjelmistojen materiaalimallien luominen. Tässä työssä ei juurikaan

syvennytty materiaalien käyttöön, joka on varmasti yksi merkittävä tekijä tulevaisuuden simulointien tulosten tarkkuudessa. Materiaalien käyttäytyminen yli $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ lämpötiloissa muuttuu huomattavasti huoneenlämpöön verrattuna, jolloin oikean materiaalivalinnan merkitys vain kasvaa.

LÄHTEET

- [1] John B. Heywood, Internal combustion engine fundamentals, McGraw-Hill, Inc., 1988, 930 p.
- [2] William H. Crouse and Donald I. Anglin, Automotive engines, 8th ed., McGraw-Hill Book co., 1994, 426 p.
- [3] Kuva: Pakoputkiston periaatekuva. Internet-lähde, saatavilla: <https://www.etrailer.com/faq-magnaflow-exhaust-systems.aspx> [viitattu 29.8.2018]
- [4] Kuva: Yksinkertainen valurautainen pakosarja. Internet-lähde, saatavilla: <http://www.iron-foundry.com/cast-iron-exhaust-manifolds.html> [viitattu 2.10.2018]
- [5] Kuva: Taivutetuista putkista valmistettu peltipakosarja. Internet-lähde, saatavilla: https://martelius.com/wordpress/wp-content/gallery/pakosarjat/330048_800.jpg [viitattu 2.10.2018]
- [6] H.K. Versteeg, W. Malalasekera, An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite-Volume Method, Pearson Education Ltd, 2nd ed., Edinburgh Gate, Harlow, England, 2007, 503 p.
- [7] Rayner Joel, Basic Engineering Thermodynamics, 5th ed., Longman Asia Ltd, Hong Kong, 1997, 647 p.
- [8] Kuva: Yksinkertainen johtuminen seinän läpi. Internet-lähde, saatavilla: <https://www.enggcyclopedia.com/wp-content/uploads/2011/09/flat-wall-heat-conduction.png> [viitattu 2.10.2018]
- [9] Kuva: Mustan kappaleen spektromagneettinen käyrä. Internet-lähde, saatavilla: <https://courses.lumenlearning.com/astronomy/chapter/the-electromagnetic-spectrum/> [viitattu 2.10.2018]
- [10] S. S. Manson, Thermal Stress and Low-cycle Fatigue, McGraw-Hill, United states of America, 1966, 404 p.
- [11] K. Höschler, J. Bischof, W. Koschel, Thermo-Mechanical Analysis of an Automotive Diesel Engine Exhaust Manifold, Temperature-Fatigue Interaction, Elsevier Science Ltd. and ESIS, 2002, 299-308 p.

- [12] Ali Akbar Partoaa, Morteza Abdolzadeh, Masoud Rezaeizadeh, Effect of Fin Attachment On Thermal Stress Reduction of Exhaust Manifold of an Off Road Diesel Engine, J.Cent. South Univ. 24, Central South University Press and Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2017, 546-559 p.
- [13] Kuva: Valtran BE 1035e sokeriruokopuimuri, jossa käytetään AGCO Power Oy:n valmistamaa dieselmoottoria. Internet-lähde, saatavilla: <http://af-rica.valtra.com/en/products/sugar-cane/harvester> [viitattu 7.10.2018]
- [14] Kuva: Tetraedrin ja polyedrin erot. ANSYS Fluent User's Guide, Release 15.0, November 2013, ANSYS, Inc. Southpointe
- [15] Kuva: Pallografiittivaluraudan jännitys-venymäkäyrä eri lämpötiloissa. Isabel Hervas, Anthony Thuault, Eric Hug, Damage Analysis of a Ferritic SiMo Ductile Cast Iron Submitted to Tension and Compression Loadings in Temperature, Metals, MDPI, Dec 2015